

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

АВДЄЄНКО ГЛІБ ЛЕОНІДОВИЧ



УДК 621.396

**МЕТОДИ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В
РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ПРИ ПРИЙМАННІ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ЗІ СФЕРИЧНИМИ ФАЗОВИМИ
ФРОНТАМИ**

Спеціальність 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Якорнов Євгеній Аркадійович
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри телекомунікацій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Конін Валерій Вікторович
Національний авіаційний університет,
професор кафедри аеронавігаційних систем

кандидат технічних наук
Войтко Віталій Віталійович,
в/ч А1906,
начальник науково-дослідної лабораторії науково-дослідного
управління

Захист відбудеться «22» березня 2021 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.14 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 255.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «05» лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д26.002.14
доктор технічних наук, професор

Л.О. Уривський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. У сучасних радіотехнічних системах (РТС) методам просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС) відводиться важливе місце, їх дослідженням та розробкою займаються практично у всіх технічно розвинених країнах світу. На даний момент часу для радіоелектронних засобів (РЕЗ) РТС різного призначення розроблено та практично реалізовано значну кількість методів ПЧОС, які дозволяють підвищити функціональні можливості РТС з визначення координат місцеположення джерел радіовипромінювання (ДРВ), а також селекції сигналів від них, зокрема в умовах впливу завад. У більшості практичних випадків ПЧОС в РЕЗ РТС розділяється на два незалежні етапи: просторову обробку, що реалізується антенною системою РЕЗ у вигляді фазованої або адаптивної антенної решітки (АР) та часову обробку, що реалізується у вузлах радіоприймача РЕЗ.

Аналіз робіт провідних вчених у галузі застосування адаптивних АР показав, що при використанні оптимальної просторової обробки для селекції корисного сигналу та режекції завад по кутовим координатам в більшості випадків застосовується математична модель електромагнітної хвилі (ЕМХ) з плоским фазовим фронтом на розкритті лінійної АР (ЛАР) РЕЗ. Між тим, при використанні ЛАР, наприклад в системах багатопозиційної радіолокації або фазової радіопеленгації ймовірною може бути ситуація, коли ДРВ потраплятиме в проміжну зону ЛАР і створюватиме на її розкритті ЕМХ зі сферичними фазовими фронтами. Використовувана модель ЕМХ з плоским фазовим фронтом призводитиме до появи помилок визначення координат місцеположення ДРВ проміжної зони, що випромінює ЕМХ зі сферичним фазовим фронтом при здійсненні в РЕЗ РТС розрахунків координат цього ДРВ. Так само при просторовій селекції корисного сигналу зі сферичним/плоским фазовим фронтом ЕМХ на фоні завад з плоскими/сферичними фронтами ЕМХ при використанні моделі ЕМХ з плоским фазовим фронтом не буде досягатися оптимальна просторова режекція завад та селекція корисного сигналу.

Сферичність фазового фронту ЕМХ вже знайшла практичне застосування в РТС для фокусування фазованої АР радіолокаційної станції в проміжну зону при дослідженні ефективності просторової селекції сигналів в умовах впливу організованих завад по бічних пелюстках діаграми спрямованості (ДС) АР, для корекції по опорному ДРВ проміжної зони вагових коефіцієнтів АР радіопеленгатора, що обумовлена неідентичністю амплітудно- та фазочастотних характеристик її приймальних каналів, і навіть для визначення дальності до ДРВ проміжної зони при його знаходженні на нульовому пеленгу, що практично реалізується шляхом повороту ЛАР та вимірювання фазових набігів між її відповідними каналами.

На даний момент знайдено теоретичну оцінку ефективності ПЧОС в РЕЗ систем радіолокації, яка при врахуванні сферичності фазового фронту ЕМХ дозволяє отримати додаткове джерело інформації і при певних умовах підвищити точність визначення дальності до ДРВ при його розташуванні в проміжній зоні. Також існує і теоретична оцінка ефективності просторової селекції ЕМХ корисного

сигналу зі сферичним/плоским фазовим фронтом на фоні ЕМХ завади з плоским/сферичним фронтом при застосуванні 3-х елементної розрідженої ЛАР (РЛАР), що особливо актуально в умовах протидії впливу організованих завад по головній пелюстці ДС ЛАР РЕЗ, коли пеленг ДРВ корисного сигналу співпадає з пеленгом ДРВ завади, тобто при відсутності розрізнення обох ДРВ за кутовими координатами, поляризацією та смугою радіочастот.

Враховуючи вищесказане, актуальною науково-технічною задачею є розробка методів просторової обробки сигналів на основі використання моделі ЕМХ зі сферичними фазовими фронтами як для одночасного визначення координат (пеленга та дальності) одного або навіть кількох ДРВ при їх розташуванні в проміжній зоні у системах фазової радіопеленгації, так і для просторової селекції сигналу обраного ДРВ від сигналів інших ДРВ з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками ЕМХ при відсутності рознесення за кутовими координатами, але наявності такого рознесення за дальністю розташування ДРВ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» у відповідності до плану роботи її науково-дослідної групи «Безпроводовий зв'язок та цифрове телебачення» за напрямком „Просторово-часова обробка радіосигналів для телекомунікаційних мереж та систем цифрового телебачення”.

Дослідження, що представлено в дисертаційній роботі проведено в рамках держбюджетних НДР: №2242-п «Розробка методів підвищення ефективності просторово-часової обробки телекомунікаційних сигналів на фоні перешкод» (№ держреєстрації 0109U002225), №2425-п «Підвищення ефективності функціонування безпроводової мережі зв'язку шляхом використання просторово-часової обробки радіосигналів в розподілених антенних системах» (№ держреєстрації 0111U001270); ініціативних НДР: «Розробка методів просторової селекції для повторного використання радіочастотного ресурсу ліній цифрового радіорелейного зв'язку» (№ держреєстрації 0116U003566), «Застосування просторової обробки за формою фазового фронту електромагнітної хвилі для підвищення пропускної здатності радіорелейної лінії зв'язку» (№ держреєстрації 0119U102123).

Мета та задачі дослідження.

Метою дисертації є підвищення ефективності визначення координат місцеположення джерел радіовипромінювання проміжної хвильової зони та їх просторової селекції шляхом розробки та удосконалення фазових методів пеленгації, а також методу просторової селекції, в математичних моделях яких враховується сферичність фазового фронту електромагнітної хвилі.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі задачі:

1. проаналізувати способи використання просторової обробки сигналів по сферичному фазовому фронту ЕМХ в РТС, визначити їх переваги та недоліки;
2. розробити фазовий метод пеленгації для визначення координат місцеположення одного ДРВ проміжної зони по сферичному фронту ЕМХ;
3. удосконалити метод пеленгації Кейпона для визначення координат

місцеположення кількох ДРВ проміжної зони по сферичних фазових фронтах ЕМХ;

4. удосконалити метод просторової селекції сигналів по сферичному фазовому фронту ЕМХ для забезпечення просторової селекції ДРВ корисного сигналу на фоні кількох ДРВ завадових сигналів, в тому числі й в умовах співпадіння їх кутових координат, але при наявності взаємного рознесення за дальністю розташування.

Об'єкт дослідження – просторово-часова обробка сигналів.

Предмет дослідження – методи просторової обробки сигналів по сферичному фазовому фронту ЕМХ.

Методи дослідження. Для розробки математичного апарату фазового методу пеленгації ДРВ проміжної зони, удосконалення математичного апарату методу пеленгації Кейпона для визначення координат кількох ДРВ проміжної зони та методу просторової селекції сигналу зі сферичним фазовим фронтом ЕМХ використовувались основні положення технічної електродинаміки, техніки НВЧ, теорії поширення радіохвиль, теорії антенно-фідерних систем, теорії просторово-часової обробки сигналів, а також математичного апарату теорії лінійної алгебри. Функціональність розроблених математичних моделей методів просторової обробки сигналів перевірялась за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MathCad та експериментальних (натурних) досліджень в лабораторних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі отримано наступні нові наукові результати:

1. Вперше розроблено фазовий метод пеленгації джерела радіовипромінювання, в математичній моделі якого враховано сферичність фазового фронту електромагнітної хвилі, що дозволяє визначати пеленг та дальність для одного джерела радіовипромінювання при його розташуванні у проміжній хвильовій зоні.

2. Удосконалено метод пеленгації Кейпона шляхом введення у вектор-гіпотезу антенної решітки замість математичної моделі електромагнітної хвилі з плоским фазовим фронтом моделі зі сферичним фронтом, що дозволяє визначати пеленг та дальність для кількох джерел радіовипромінювання при їх розташуванні в проміжній хвильовій зоні.

3. Удосконалено метод просторової селекції сигналів, який відрізняється тим, що використовує метод пеленгації кількох джерел радіовипромінювання для отримання інформації про просторове положення джерел радіовипромінювання, що дозволяє по сферичності фазових фронтів електромагнітних хвиль розділяти один від одного сигнали з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками від кількох джерел радіовипромінювання, в тому числі й при співпадінні їх пеленгів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропоновані технічні рішення з побудови фазових пеленгаторів та фазових радіосистем визначення координат по сферичному фазовому фронту ЕМХ, які можуть бути використані у радіоелектронній промисловості розробниками апаратури РТС для побудови технічних засобів радіопеленгації та радіомоніторингу ДРВ, при розробці апаратури радіолокаційних систем.

2. Розроблено структурну схему та алгоритм практичної реалізації системи просторової селекції по сферичному фронту ЕМХ, яка дозволяє розділяти

радіосигнали з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками від двох та більше ДРВ, що розташовані на одному пеленгу, але на різних дальностях.

3. Запропоновано варіанти структурних схем системи супроводження рухомих об'єктів з просторовою селекцією сигналів по сферичності фазового фронту ЕМХ в умовах впливу на навігаційний канал та/або канал зв'язку навмисних завад.

4. Розроблено структурну схему двоканальної телевізійної системи надвисокочастотного діапазону, яка при її технічній реалізації може бути використана при побудові наземних мереж розподілу телевізійних сигналів, а також для ущільнення стволів радіорелейних ліній при одночасному передаванні та прийманні в одній і тій самій смузі радіочастот двох мультимплексів цифрового телевізійного мовлення.

5. Розроблено лабораторний макет компенсатору завад для дослідження просторової селекції ЕМХ по сферичному фазовому фронту від двох ДРВ надвисокочастотного (НВЧ) діапазону, що розташовані на одному пеленгу.

6. Розроблено лабораторний макет двоканальної телевізійної системи НВЧ діапазону з просторовою селекцією сигналів по сферичності фазового фронту ЕМХ, що може бути використаний при проведенні експериментальних досліджень у напрямку підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу систем телевізійного мовлення та/або радіорелейного зв'язку або в навчальному процесі.

Новизна більшості математичних моделей, методів та алгоритмів просторової обробки сигналів по сферичності фазового фронту ЕМХ підтверджена 20 патентами на способи та РТС.

Результати виконаного дисертаційного дослідження можуть будуть використані відомчими установами України в галузі телекомунікацій та розробниками апаратури РТС.

Розроблений в результаті проведених досліджень матеріал увійшов до лекційних, практичних та лабораторних занять з кредитного модулю «Адаптивні системи в телекомунікаціях», кредитного модулю «Системи адаптації в телекомунікаціях», що викладалися на кафедрі телекомунікацій ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського до 2018 р.

Результати дисертаційних досліджень автора у формі запропонованої системи придушення активних навмисних завад для приймальних пристроїв систем глобальної супутникової радіонавігації на основі використання сферичності (кривизни) хвильових фронтів радіосигналів реалізовані в державному НДІ «Комета» при розробці приймальних пристроїв для перспективних радіотехнічних систем (шифр роботи МГ/02-ЕН/01) (Акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 01.06.2005 р.).

Наукові результати, що отримані особисто автором - «Методика визначення дальності джерел радіовипромінювань за кривизною фронтів їх електромагнітних хвиль» використані та реалізовані в рамках виконання військовою частиною А1906 планових науково-дослідних робіт: «Навігатор», «Кираса», (тематика закрыта) (Акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 24.07.2007 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи, що отримані автором як самостійно та в співавторстві з іншими вченими, опубліковано

в фахових виданнях. Зокрема, в публікаціях [3, 5] авторів належить виведення математичних співвідношень для визначення дальності та пеленгу ДРВ по сферичності фазового фронту його ЕМХ; в роботі [2] проведено математичне моделювання залежності дальності до ДРВ від різниці різниць фаз; в роботах [1, 6, 7] запропоновано спосіб визначення різниці різниць фаз методом множення частоти; в роботі [8] проведено математичне моделювання ефективності просторово-часової обробки сигналів на базі використання кронекерівського добутку; в роботі [9] авторів належить методика синтезу алгоритму просторово-часової обробки сигналів для антенних систем з широкою ХС; в роботі [10] автором проаналізовано особливості застосування просторово-часової обробки в умовах наявності некорельованих складових сигналу, а в роботі [11] – аналіз методів просторово-часової обробки сигналів в системах безпроводового зв'язку, що базуються на використанні принципів просторового, кодового та часового рознесення елементів сигналу; в роботі [12] автором отримано рівняння для розрахунку вектору вагових коефіцієнтів на базі використання торцевих добутків; в роботі [13] отримано адаптовані до дії завад ХС АР базових станцій; в роботах [14, 15, 19] здобуток автора представлений у вигляді розроблення та опису принципів дії структурних схем фазових радіопеленгаторів та фазових радіосистем визначення координат, що враховують сферичність фазового фронту ЕМХ; в роботі [16] авторів належить опис концепції застосування просторової селекції по формі фронту ЕМХ в системах безпроводового зв'язку; в роботах [17, 18] авторів належать математичні співвідношення та методика оцінювання ефективності просторової селекції радіосигналів по сферичності фазових фронтів ЕМХ в системах стаціонарного безпроводного зв'язку; а в роботі [20] автор власноруч розробив та описав принцип дії безпроводової лінії зв'язку, в якій радіосигнали кількох абонентів одночасно передаються в одній й тій самій смузі радіочастот з різною сферичністю фазових фронтів їх ЕМХ; в роботі [21] авторів належить математичне моделювання динамічної помилки вимірювання дальності до ДРВ; в роботі [22] авторів належить опис принципу дії макету симплексної одноінтервальної радіорелейної лінії, а також результати вимірювання коефіцієнтів ослаблення та придушення радіосигналів з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками та оцінка достовірності приймання відселектованих по сферичності фазових фронтів ЕМХ радіосигналів стандарту DVB-C з модуляцією QAM-64.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень пройшли апробацію на: 15-й (КриМіКо'2005), 16-й (КриМіКо'2006), 17-й (КриМіКо'2007), 19-й (КриМіКо'2009), 20-й (КриМіКо'2010), 21-й (КриМіКо'2011), 23-й (КриМіКо'2013), 24-й (КриМіКо'2014) Міжнародній Кримській конференції «НВЧ техніка та телекомунікаційні технології» (Україна, м.Севастополь, СевНТУ, 12-16 вересня 2005 р, 11-15 вересня 2006 р., 10-14 вересня 2007 р., 14-18 вересня 2009 р, 13-17 вересня 2010 р., 12-16 вересня 2011 р., 8-13 вересня 2013 р., 7-13 вересня 2014 р.); 3-й (РТ-2007), 4-й (РТ-2008), 9-й (РТ-2013) Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій» (Україна, м. Севастополь, СевНТУ, 16-21 квітня 2007 р.,

21-25 квітня 2008 р., 22-26 квітня 2013 р.); 1-й (ПТ-2007), 2-й (ПТ-2008), 3-й (ПТ-2009), 5-й (ПТ-2011), 6-й (ПТ-2012), 7-й (ПТ-2013), 8-й (ПТ-2014), 9-й (ПТ-2015), 11-й (ПТ-2017), 12-й (ПТ-2018) Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (Україна, м. Київ, ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, 25-27 квітня 2007 р., 20-23 травня 2008 р., 21-24 квітня 2009 р., 19-22 квітня 2011 р., 24-27 квітня 2012 р., 16-19 квітня 2013 р., 22-25 квітня 2014 р., 21-24 квітня 2015 р., 19-22 квітня 2016 р., 16-20 квітня 2018 р.); 13-й (ПТ-2019) міжнародно-технічній конференції «Перспективи телекомунікацій» (Україна, м. Київ, ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, 15-19 квітня 2019 р.); 4-й та 8-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (Україна, м. Одеса, ОНАЗ ім. О. С. Попова, 30-31 жовтня 2014 р., 14-16 листопада 2018 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта)» (Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 22-29 лютого 2012 р., 11-15 березня 2013 р., 10-16 березня 2014 р., 20-26 березня 2017 р.); 1-й, 2-й та 7-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми телекомунікацій. Наука і технології (PICS&T)» (Україна, м. Харків, ХНУРЕ, 9-11 жовтня 2013 р., 14-17 жовтня 2014 р., м. Київ, Київський університет імені Бориса Грінченка, 8-11 жовтня 2019 р.); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки UkrMiCo 2016 (Україна, м. Київ, ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, 11-15 вересня 2016 р.), UkrMiCo 2018 (Україна, м. Одеса, ОНАЗ ім. О. С. Попова, 11-14 вересня 2018 р.).

Публікації. Основні положення дисертації, які в достатній мірі відображують результати роботи, що виносяться на захист, опубліковані у 89 наукових працях, у тому числі в 22 статтях у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у періодичному виданні України, що включено до міжнародної наукометричної бази Scopus та 1 стаття у періодичному виданні іноземної держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку, що включено до міжнародної наукометричної бази Scopus), 1 патенті на винахід, 19 патентах на корисну модель, 47 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списків використаних джерел та 3-х додатків. Загальний обсяг дисертації складає 253 сторінки. Обсяг основної частини дисертації становить 180 сторінок. Робота містить 112 рисунків та 7 таблиць. Список використаних літературних джерел складається з 148 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У Вступі обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи. Визначено мету роботи, основні задачі та методи досліджень. Сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та публікації.

У першому розділі проведено короткий аналіз публікацій, що показує інтерес зі сторони світової науково-технічної спільноти до питань застосування ПЧОС по

сферичному фазовому фронту ЕМХ для вирішення ряду науково-практичних задач в різних РТС, у першу чергу в системах радіолокації.

Показано, що не вирішеними є задача знаходження координат місцеположення (дальності та пеленга) ДРВ по сферичному фазовому фронту ЕМХ, особливо для кількох джерел ДРВ, що розташовані як в проміжній так й у далекій зоні для фазового способу визначення координат ДРВ, а також задача просторової селекції по сферичному фазовому фронту ЕМХ корисного сигналу на фоні кількох завад, ДРВ яких знаходяться на одному пеленгу, але в різних хвильових зонах, особливо при їх розташуванні на різних дальностях в проміжній зоні.

У **другому розділі** запропоновано метод фазової пеленгації для визначення координат місцеположення одного ДРВ, який на відміну від відомих методів визначає факт наявності на розкритті РЛАР гармонійної ЕМХ зі сферичним фазовим фронтом від ДРВ проміжної зони, що дозволяє перевести фазовий радіопеленгатор (ФРП) або фазову радіосистему визначення координат (ФРСВК) з режиму оцінювання пеленгу β та кута місця α для плоского фазового фронту ЕМХ в режим оцінювання пеленга та кута місця ДРВ, а також у випадку необхідності й дальності d до нього по сферичному фазовому фронту ЕМХ.

На рис.1 зображено РЛАР, а на рис.2 показано розріджену площинну АР (РПАР), що складається з двох взаємно перпендикулярних РЛАР, які можуть бути використані для врахування сферичності фазового фронту ЕМХ відповідно у ФРП та ФРСВК при визначенні координат (пеленг β , кут місця α , дальність d) одного ДРВ, що розташоване в проміжній зоні РЛАР або РПАР.

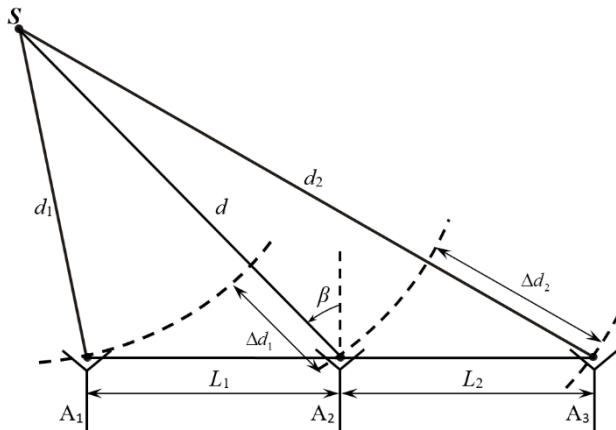


Рисунок 1 – Трьохелементна РЛАР

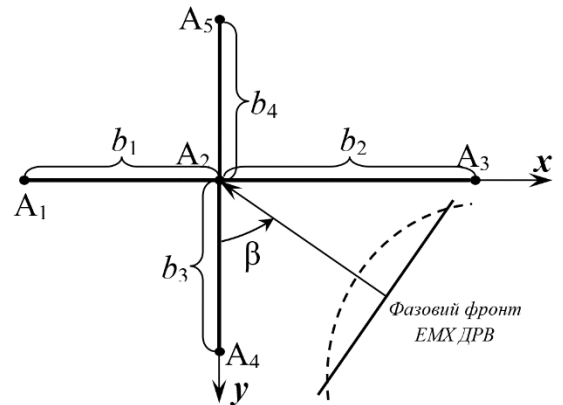


Рисунок 2 – П'ятиелементна РПАР

Суть запропонованого фазового методу пеленгації для визначення координат ДРВ полягає у використанні сферичності фазового фронту ЕМХ на розкритті РЛАР, яке проявляється у вигляді нелінійної аналітичної залежності фазового зсуву гармонійного коливання між сусідніми елементами РЛАР від пеленга ДРВ та дальності до ДРВ, відповідно для визначення пеленга ДРВ та дальності до ДРВ при його розташуванні в проміжній зоні РЛАР РЕЗ (рис.1)

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi\Delta d_1}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(d - \sqrt{L_1^2 + d^2 - 2L_1d\sin\beta} \right), \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi\Delta d_2}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{L_2^2 + d^2 + 2L_2d\sin\beta} - d \right), \quad (2)$$

де $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta d_1, \Delta d_2$ – різниці фаз та різниці ходу сигналів для першої (A_1, A_2) та другої (A_2, A_3) антенних пар РЛАР відповідно; L_1 та L_2 – відстань між відповідними елементами РЛАР; λ – довжина ЕМХ.

На основі співвідношень (1) та (2) отримано ряд точних аналітичних виразів для визначення пеленга ДРВ та дальності до ДРВ при його розташуванні у проміжній зоні, що представлені в табл.1.

Таблиця 1 – Точні формули для визначення координат місцеположення ДРВ проміжної зони

Формула для обчислення пеленгу ДРВ	$\beta = \arcsin \left\{ \frac{\lambda [4\pi^2 (L_1^2 \Delta\varphi_2 + L_2^2 \Delta\varphi_1) - \lambda^2 \Delta\varphi_1 \Delta\varphi_2 (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)]}{2\pi [4\pi^2 (L_1^2 L_2 + L_2^2 L_1) - \lambda^2 (\Delta\varphi_1^2 L_2 + \Delta\varphi_2^2 L_1)]} \right\},$
Формула для обчислення дальності до ДРВ	$d = \frac{4\pi^2 L_1 L_2 (L_1 + L_2) - \lambda^2 (\Delta\varphi_1^2 L_2 + \Delta\varphi_2^2 L_1)}{4\pi \lambda (\Delta\varphi_2 L_1 - \Delta\varphi_1 L_2)}$ $d = \frac{4\pi^2 (L_1^2 + L_2^2) - \lambda^2 (\Delta\varphi_1^2 + \Delta\varphi_2^2)}{4\pi \lambda \Delta\varphi - 8\pi^2 (L_2 - L_1) \sin \beta}, \quad d = \frac{\lambda^2 (\Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_1) \Delta\varphi - 4\pi^2 (L_2^2 - L_1^2)}{4\pi [2\pi (L_2 + L_1) \sin \beta - \lambda (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)]}$

У табл.1 параметр $\Delta\varphi$ – це подвійна різниця фаз, що визначається, як

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1. \quad (3)$$

У дисертації показано, що при потраплянні ДРВ в проміжну зону РЛАР РЕЗ можна розглядати вплив на цю решітку гармонійної ЕМХ зі сферичним фазовим фронтом як внесення додаткового квадратичного фазового розподілу до лінійного фазового розподілу, що притаманний плоскому фронту ЕМХ на розкритті РЛАР. Вказане дозволяє представити параметри $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ при виконанні умови $L_i \ll d, i=1,2$ у вигляді

$$\Delta\varphi_1 \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left(L_1 \sin \beta - \frac{L_1^2}{2d} (\cos \beta)^2 \right), \quad \Delta\varphi_2 \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left(L_2 \sin \beta + \frac{L_2^2}{2d} (\cos \beta)^2 \right). \quad (4)$$

На основі співвідношень (4) отримано ряд наближених аналітичних виразів для визначення пеленга ДРВ та дальності до ДРВ при його розташуванні у проміжній зоні РЛАР, що представлені в табл.2.

У випадку, що найбільш часто зустрічається в РТС, тобто коли $L_1 = L_2 = L$, співвідношення для визначення пеленгу ДРВ та дальності до нього можна представити у більш простій формі, як показано в табл.3.

При розташуванні ДРВ у далекій зоні, його пеленг може бути визначений за будь-якої з формул в табл.1-табл.3, дальність до ДРВ при цьому не визначається.

При застосуванні РПАР (рис.2), яка складається з баз b_1, b_2, b_3, b_4 , математичні співвідношення для визначення координат ДРВ представлено в табл.4.

У табл.4 база $b_4 = 0,5\lambda$, а

$$\Delta\varphi_{42\text{повн}} = \frac{2\pi}{\lambda} b_3 \cos \beta \cos \alpha = \Delta\varphi_{42\text{вим}} + 2\pi k_{42}, \quad \Delta\varphi_{23\text{повн}} = \Delta\varphi_{23\text{вим}} + 2\pi k_{23}, \quad \Delta\varphi_{25\text{повн}} = \Delta\varphi_{25\text{вим}} + 2\pi k_{25}, \quad \Delta\varphi_{12\text{повн}} = \Delta\varphi_{12\text{вим}} + 2\pi k_{12}, \quad (5)$$

де $\Delta\varphi_{42\text{вим}}, \Delta\varphi_{23\text{вим}}, \Delta\varphi_{25\text{вим}}, \Delta\varphi_{12\text{вим}}$ – вимірний фазометрами фазовий зсув між антенами A_4 та A_2 , A_2 та A_3 , A_2 та A_5 , A_1 та A_2 відповідно; $k_{42}, k_{23}, k_{25}, k_{12}$ – ціла кількість періодів, які втрачено при вимірюваннях; $F(\beta, \alpha)$ – пеленгаційна характеристика, яка при пеленгації ДРВ далекої зони дорівнює

$$F(\beta, \alpha) = \operatorname{tg} \left[\frac{\pi(b_2 - b_1)}{\lambda} \cos \alpha \sin \beta \right]. \quad (6)$$

Таблиця 2 – Наближені формули для визначення координат місцеположення ДРВ проміжної зони

Формула для обчислення пеленгу ДРВ	$\beta \approx \arcsin \left(\frac{\lambda (L_2^2 \Delta \varphi_1 + L_1^2 \Delta \varphi_2)}{2\pi L_1 L_2 (L_1 + L_2)} \right)$
Формула для обчислення дальності до ДРВ	$d \approx \frac{\pi(L_1^2 + L_2^2)(\cos \beta)^2}{\lambda \Delta \varphi - 2\pi(L_2 - L_1) \sin \beta}$

Таблиця 3 – Точні та наближені формули для визначення координат місцеположення ДРВ проміжної зони при $L_1 = L_2 = L$

	Точна формула	Наближена формула
Формула для обчислення пеленгу ДРВ	$\beta = \arcsin \left(\frac{\lambda (\Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2) [8\pi^2 L^2 - 2\lambda^2 \Delta \varphi_1 \Delta \varphi_2]}{4\pi L (8\pi^2 L^2 - \lambda^2 (\Delta \varphi_1^2 + \Delta \varphi_2^2))} \right)$	$\beta \approx \arcsin \left(\frac{\lambda}{4\pi L} (\Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2) \right)$
Формула для обчислення дальності до ДРВ	$d = \frac{8\pi^2 L^2 - \lambda^2 (\Delta \varphi_1^2 + \Delta \varphi_2^2)}{4\pi \lambda \Delta \varphi},$ $d = \frac{\lambda^2 \Delta \varphi \cdot (\Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2)}{4\pi (4\pi L \sin \beta - \lambda (\Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2))}$	$d \approx \frac{2\pi (L \cos \beta)^2}{\lambda \Delta \varphi}$

Таблиця 4 – Формули для визначення координат місцеположення ДРВ проміжної та далекої зон

	Плоский фронт ЕМХ (Далека зона)	Сферичний фронт ЕМХ (Проміжна зона)
Формула для обчислення пеленгу ДРВ	$\beta = \arctg \left(\frac{2b_3 \arctg (F(\beta, \alpha))}{(b_1 - b_2) \Delta \varphi_{42\text{повн}}} \right)$	$\beta = \arctg \left(\frac{(b_3 b_4^2 + b_3^2 b_4) (b_2^2 \Delta \varphi_{12\text{повн}} + b_1^2 \Delta \varphi_{23\text{повн}})}{(b_1 b_2^2 + b_1^2 b_2) (b_3^2 \Delta \varphi_{25\text{повн}} + b_4^2 \Delta \varphi_{42\text{повн}})} \right)$
Формула для обчислення кута місця ДРВ	$\alpha = \arccos \sqrt{\left(\frac{\lambda \arctg (F(\beta, \alpha))}{\pi (b_1 - b_2)} \right)^2 + \left(\frac{\lambda \Delta \varphi_{42\text{повн}}}{2\pi b_3} \right)^2}$	$\alpha = \arccos \left(\sqrt{\left(\frac{\lambda (b_2^2 \Delta \varphi_{12\text{повн}} + b_1^2 \Delta \varphi_{23\text{повн}})}{2\pi (b_1 b_2^2 + b_1^2 b_2)} \right)^2 + \left(\frac{\lambda (b_3^2 \Delta \varphi_{25\text{повн}} + b_4^2 \Delta \varphi_{42\text{повн}})}{2\pi (b_3 b_4^2 + b_3^2 b_4)} \right)^2} \right)$
Формула для обчислення дальності до ДРВ	дальність до ДРВ не визначається	$d \approx \frac{\pi b_1^2 (1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \beta)}{\lambda \Delta \varphi_{12\text{повн}} - 2\pi b_1 \cos \alpha \sin \beta}, d \approx \frac{\pi b_2^2 (1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \beta)}{2\pi b_2 \cos \alpha \sin \beta - \lambda \Delta \varphi_{23\text{повн}}}$ $d \approx \frac{\pi b_4^2 (1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \beta)}{\lambda \Delta \varphi_{42\text{повн}} - 2\pi b_4 \cos \alpha \cos \beta}$

У табл.5 представлено формули для розрахунку методичної та апаратурної похибок визначення пеленга ДРВ та дальності до ДРВ, які відповідно обумовлені використанням наближених формул та похибкою вимірювання фази у фазометрах (типове значення $\delta \varphi = \pi/90 \dots \pi/60 = 2^\circ \dots 3^\circ$), а на рис.3 – рис.6 відповідні графічні залежності.

Аналіз графіку на рис.3 показує, що неповне врахування сферичності фазового фронту ЕМХ, що обумовлене використанням квадратичного наближення фазового розподілу, веде до методичної похибки визначення пеленга ДРВ в межах $\delta \beta_1 = \pm 0,15^\circ \dots 15^\circ$ для дальностей розташування ДРВ в межах $d_1 = 10L \dots L$ в кутовому секторі спостереження $\pm 45^\circ$.

Таблиця 5 – Методична та апаратурна похибки визначення пеленгу ДРВ та його дальності

	Методична	Апаратурна (при $\delta\varphi=\pi/60$)
Формула для обчислення похибки визначення пеленгу ДРВ	$\delta\beta_1 = \left(\beta - \arcsin \left[\frac{\sqrt{\chi^2 + 2\chi \sin(\beta) + 1} - \sqrt{\chi^2 - 2\chi \sin(\beta) + 1}}{2\chi} \right] \right)$	$\delta\beta_2 = \frac{\lambda\sqrt{2}}{240L \cos \beta}$
Формула для обчислення похибки визначення дальності до ДРВ	$\delta d_1 = \frac{1}{4} \frac{L^2}{d}$	$\delta d_2 = \frac{\pi}{30\sqrt{2}} d$

У табл.5 параметр $\chi = L/d$ – відношення розмірів бази РЛАР до дальності до ДРВ.

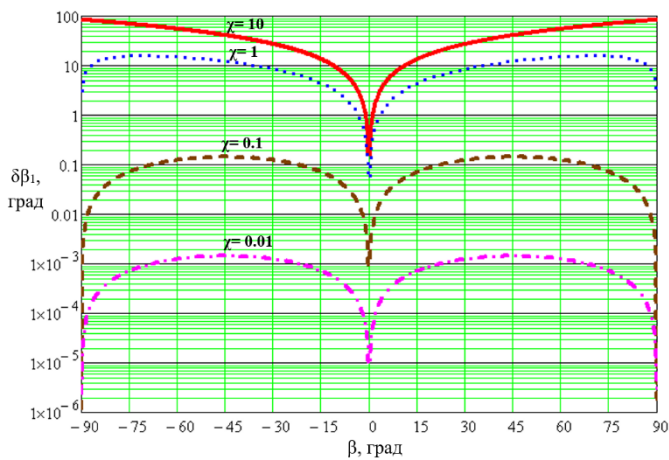


Рисунок 3 – Графік залежності методичної похибки визначення пеленга ДРВ від дійсного значення пеленга ДРВ на частоті $f = 3$ ГГц

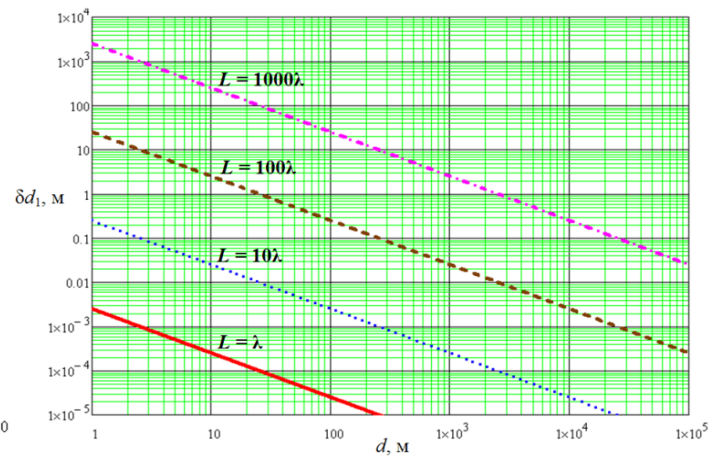


Рисунок 4 – Графік залежності методичної похибки визначення дальності до ДРВ від дійсного значення дальності до ДРВ при $\lambda = 0,1$ м та $\beta = 0^\circ$

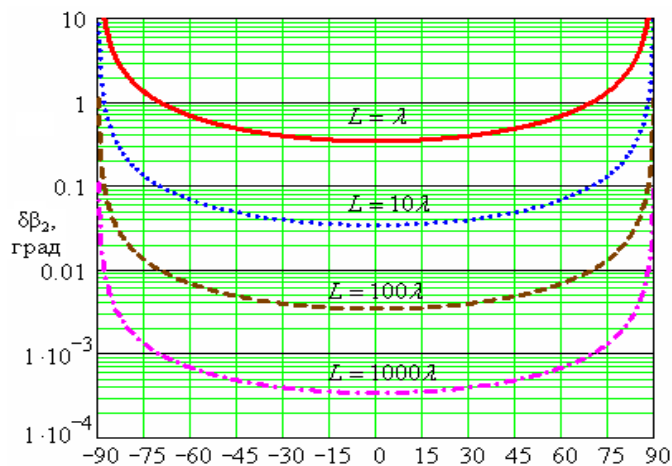


Рисунок 5 – Графік залежності апаратурної похибки визначення пеленга фазовим методом від пеленга ДРВ при апаратурній похибці вимірювання фазового зсуву $\delta\varphi = 3^\circ$

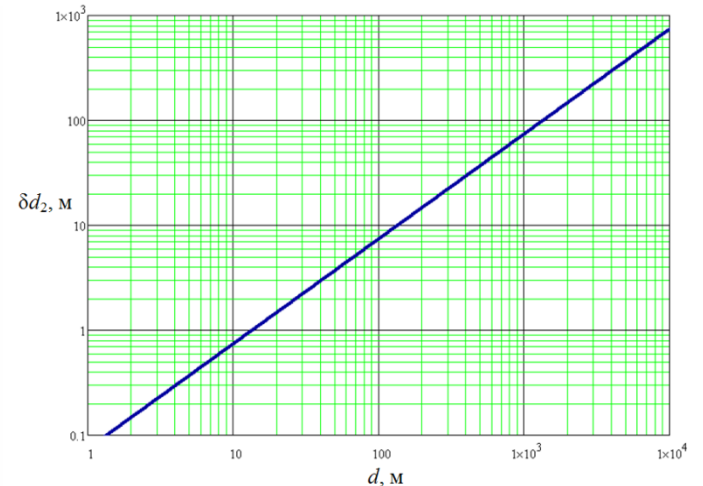


Рисунок 6 – Графік залежності апаратурної похибки визначення дальності до ДРВ фазовим методом від дійсного значення дальності до ДРВ при апаратурній похибці вимірювання фазового зсуву $\delta\varphi = 3^\circ$

Аналіз графіку на рис.4 показує, що методична похибка визначення дальності до ДРВ проміжної зони при $L = (100 \dots 1000)\lambda$ та дальності до ДРВ, що дорівнює $d = 100$ м, яка обумовлена використанням квадратичного наближення фазового розподілу, змінюється в межах $\delta d_1 = 0,2 \dots 20$ м, а для дальності до ДРВ, що дорівнює $d = 1000$ м – в межах $\delta d_1 = 0,02 \dots 2$ м. Зі збільшенням дальності до ДРВ при фіксованій довжині бази L методична похибка δd_1 зменшується, оскільки сферичний фазовий фронт ЕМХ наближається до плоского.

Структурна схема фазового методу визначення координат ДРВ по сферичному фазовому фронту ЕМХ, що пропонується, представлена на рис.7. Відповідно до рис.7 етапом, що передує етапу визначення координат ДРВ є етап перевірки на наявність сферичності фазового фронту ЕМХ. Критерієм наявності сферичності фазового фронту ЕМХ для РЛАР, що зображена на рис.1 є

$$\Delta\varphi_1 \neq \Delta\varphi_2 \text{ при умові } L_1 = L_2 = L \text{ або } \Delta\varphi_2 \neq \frac{L_2}{L_1} \Delta\varphi_1 \text{ при умові } L_1 \neq L_2. \quad (7)$$

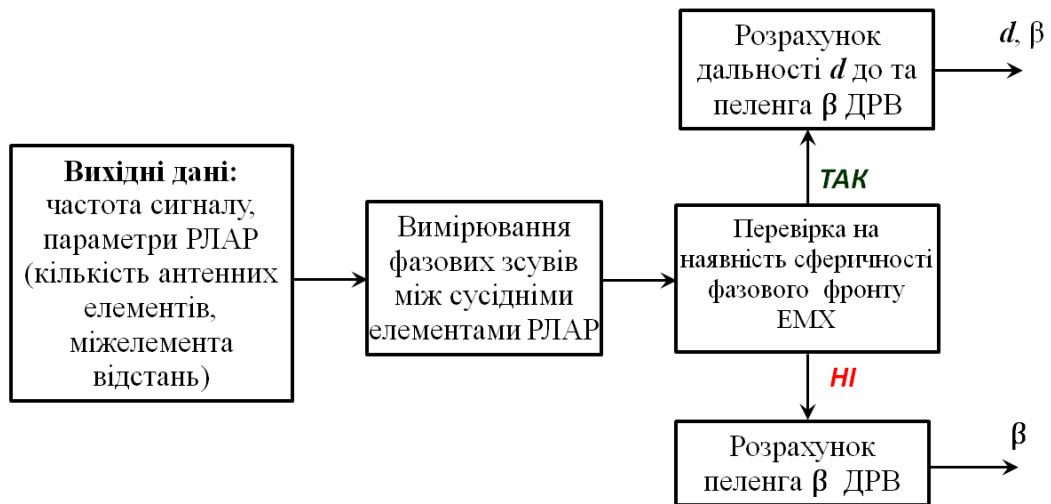


Рисунок 7 – Структурна схема фазового методу для визначення координат ДРВ за формою фронту ЕМХ

Отже, для визначення типу фазового фронту ЕМХ (плоский чи сферичний) та визначення координат ДРВ (тобто пеленга β та дальності d до нього) за допомогою 3-х елементної РЛАР необхідно виміряти фазові зсуви $\Delta\varphi_1$ та $\Delta\varphi_2$ та виконати розрахунки за формулами, що представлені в табл.1 – табл.4.

Головні обмеження, що накладаються на запропонований метод:

1. кількість ДРВ - 1;
2. гармонійна форма ЕМХ;
3. відсутність випадкових флуктуацій фази в каналах РЛАР ФРП та флуктуацій напрямку надходження ЕМХ;
4. відсутність впливу багатопроменевого поширення ЕМХ.

На рис.8,а представлено розроблено узагальнену структурну схему системи (ФРП/ФРСВК) визначення координат ДРВ, що базується на застосуванні запропонованого фазового методу пеленгації для визначення координат місцеположення ДРВ по сферичному фазовому фронту ЕМХ.

У третьому розділі роботи показано, що класичний метод пеленгації Кейпона не забезпечує визначення пеленгів ДРВ, які розташовані у проміжній зоні еквідистантної ЛАР радіопеленгатора. Тому, для забезпечення пеленгації ДРВ проміжної зони запропоновано удосконалити класичний метод Кейпона шляхом введення математичної моделі сферичного фазового фронту ЕМХ замість моделі плоского фазового фронту ЕМХ у вектор-гіпотезу (керуючий вектор) ЛАР при

обчислені функції просторового спектру. При цьому вказаний вектор-гіпотеза ЛАР матиме вигляд

$$\mathbf{S}_\alpha(\beta, d) = F(\beta) \left[\exp(-j\Delta\varphi_1(\beta, d)) \exp(-j\Delta\varphi_2(\beta, d)) \dots \exp(-j\Delta\varphi_M(\beta, d)) \right]^T, \quad (8)$$

де $F(\beta)$ – характеристика спрямованості окремого елемента ЛАР (вважатимемо далі всі елементи ЛАР ідентичними і слабоспрямованими, тобто $F(\beta) \approx 1$); M – кількість елементів ЛАР; $\Delta\varphi_m(\beta, d)$ – фазовий зсув між m -м та центральним елементом ЛАР для очікуваного сигналу від ДРВ, що розташоване в проміжній зоні на дальності d та пеленгу β , який розраховується відповідно, $m = 1 \dots M$

$$\Delta\varphi_m(\beta, d) = \frac{2\pi}{\lambda} (d_m(\beta, d) - d), \quad (9)$$

де $d_m(\beta, d)$ – дальність від ДРВ з координатами (β, d) до m -го елемента ЛАР радіопеленгатора, яка для моделі ЛАР зі сферичним фазовим фронтом ЕМХ, що показана на рис.9,а розраховується за формулою

$$d_m(\beta, d) = \sqrt{0,25(M+1-2m)^2 L^2 + d^2 + (M+1-2m)Ld \sin\beta}. \quad (10)$$

Для виявлення n -го ДРВ проміжної зони, що розташоване на пеленгу β_n та дальності d_n за допомогою метода пеленгації Кейпона у формулу (8) необхідно підставити $d = d_n$, $\beta = \beta_n$, $n = 1 \dots N_{\text{ПЗ}}$, де $N_{\text{ПЗ}}$ – кількість ДРВ в проміжній зоні.

У роботі показано, що при виконанні умови $d \rightarrow \infty$, яка еквівалентна переміщенню ДРВ з проміжної зони у далеку зону ЛАР, вектор-гіпотеза очікуваного сигналу ДРВ проміжної зони переходить у вектор-гіпотезу очікуваного сигналу ДРВ далекої зони $\mathbf{S}_\alpha(\beta, d) = \mathbf{S}_\alpha(\beta)$, який згідно з рис.9,б матиме вигляд:

$$\mathbf{S}_\alpha(\beta) = \left[\exp(-j(M-1)\Delta\varphi(\beta)) \exp(-j(M-2)\Delta\varphi(\beta)) \dots 1 \right]^T, \quad (11)$$

де $\Delta\varphi(\beta)$ – набіг фази несучого коливання ЕМХ між сусідніми елементами ЛАР, який дорівнює

$$\Delta\varphi(\beta) = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda c} = \frac{2\pi L}{\lambda} \sin\beta. \quad (12)$$

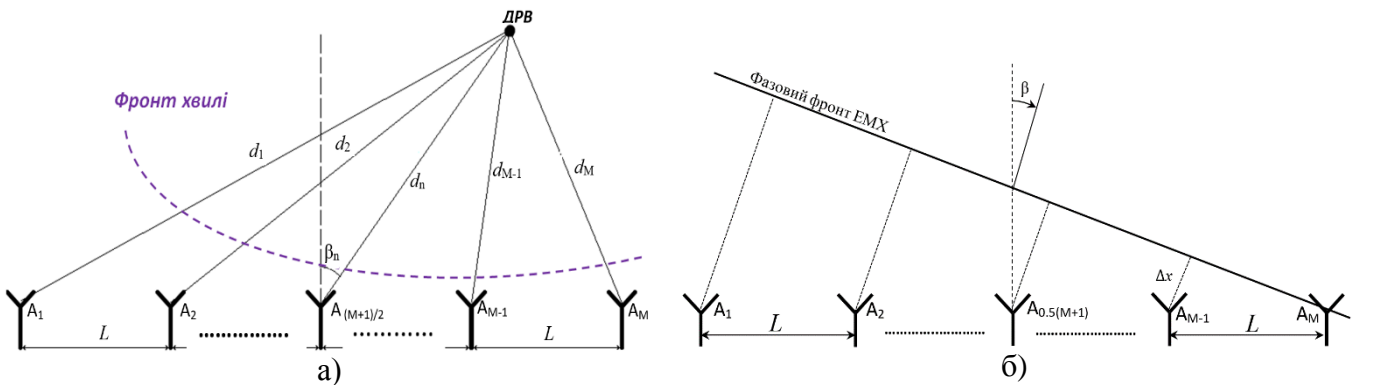


Рисунок 9 – Еквідистантна ЛАР зі сферичним (а) та плоским (б) фронтом ЕМХ на її розкритті

Запропонований удосконалений метод пеленгації Кейпона та узагальнений удосконалений метод пеленгації Кейпона передбачатиме обчислення відповідно функцій просторового спектру $Q_{\text{ПЗ}}(\beta, d)$ та $Q_{\text{УПЗ}}(\beta, d)$ по вихідних сигналах ЛАР, яка

залежить як від пеленга β ДРВ так і від дальності d його розташування в проміжній зоні, тобто

$$Q_{\text{ПЗ}}(\beta, d) = \frac{1}{\mathbf{S}_a^H(\beta, d) \cdot \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \cdot \mathbf{S}_a(\beta, d)}, \quad Q_{\text{УУ.ПЗ}}(\beta, d) = \frac{1}{\mathbf{S}_a^H(\beta, d) \cdot \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-N} \cdot \mathbf{S}_a(\beta, d)} \quad (13)$$

де \mathbf{R}_{xx} – кореляційна матриця вхідних сигналів ЛАР, $\mathbf{R}_{\text{xx}}^{-N} = \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \cdot \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1}$ – послідовний добуток, що складається з N обернених кореляційних матриць вхідних сигналів.

Отже, визначивши вектор-гіпотезу ЛАР $\mathbf{S}_a(\beta, d)$, який дозволяє враховувати сферичність фазового фронту ЕМХ ДРВ на розкритті ЛАР, алгоритм визначення кута пеленга β_n і дальності d_n до n -го ДРВ, що розташовані в проміжній зоні ЛАР радіопеленгатору, можна представити етапами, що показано на рис.10. Результати розрахунків просторового спектру при $M = 20$ та $\lambda = 0,3$ м показано рис.11-рис.13.

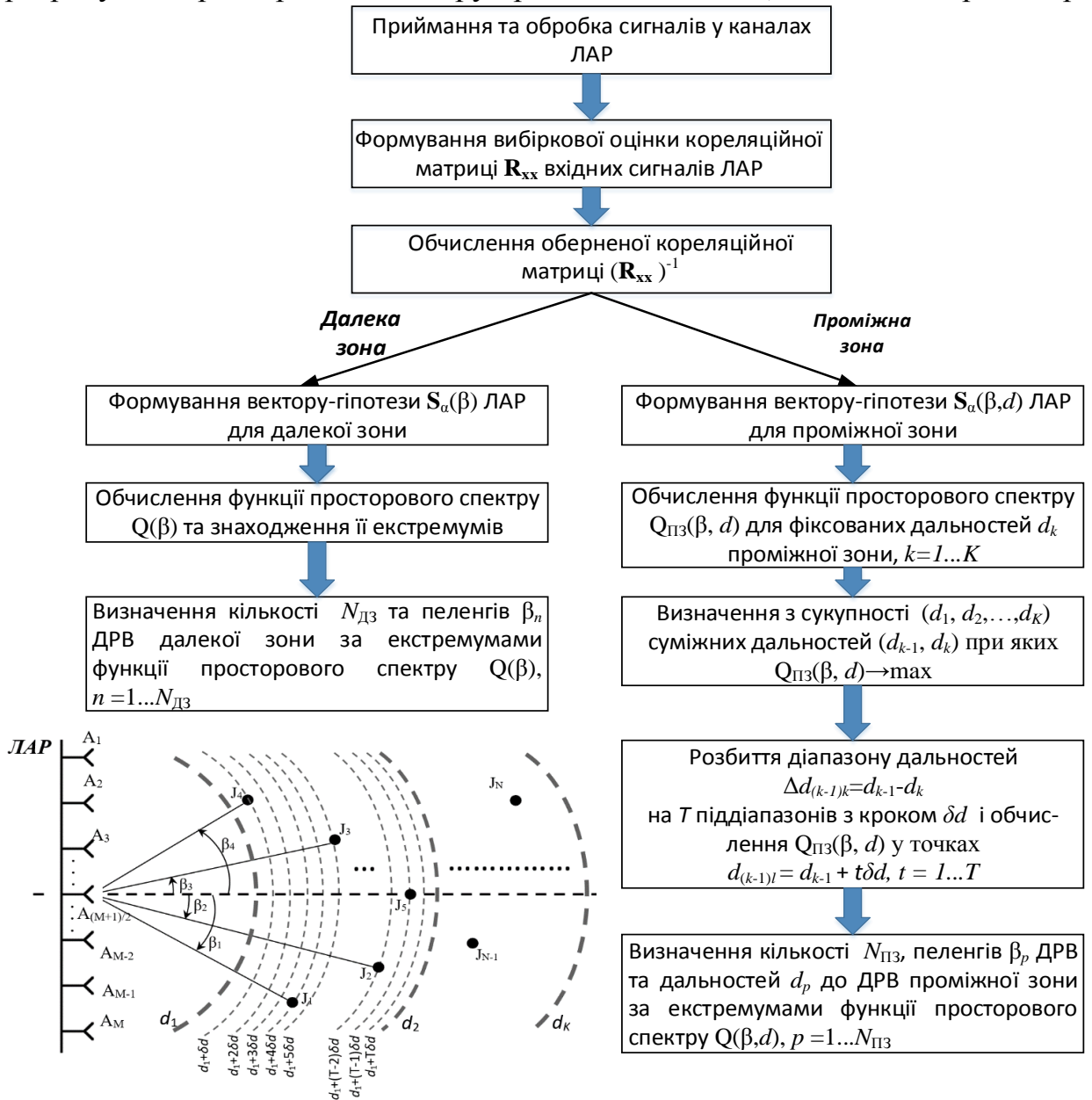


Рисунок 10 – Основні етапи удосконаленого методу Кейпона для визначення координат місцеположення ДРВ в проміжній зоні, що пропонується

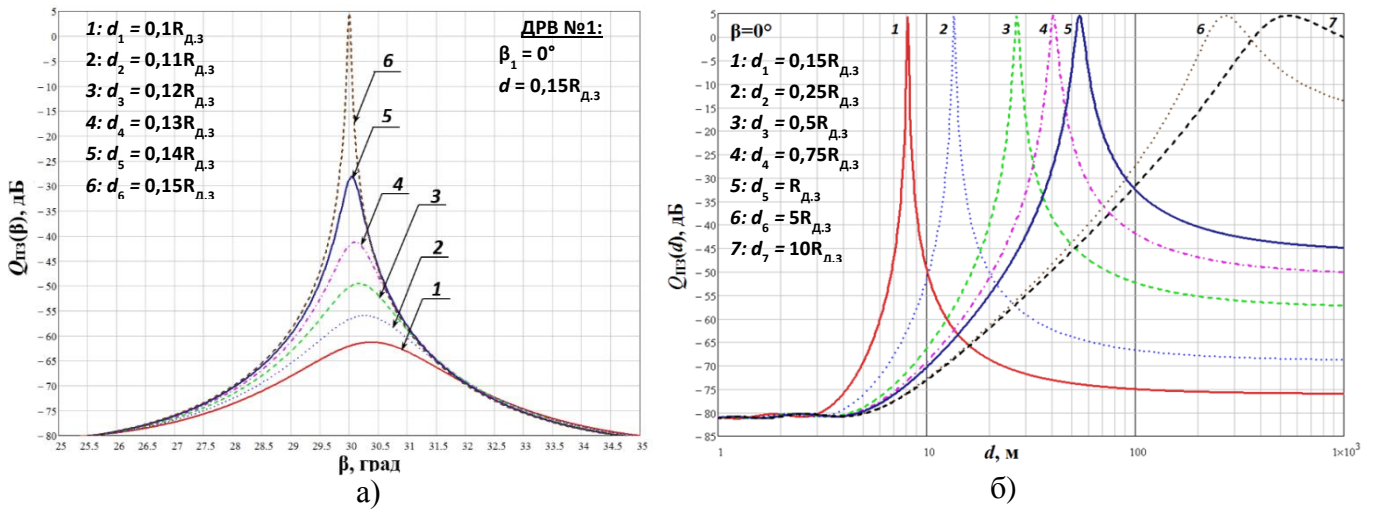


Рисунок 11 – Просторовий спектр при пеленгуванні одного ДРВ, що розташоване а) на пеленгу $\beta_0=0^\circ$ і дальності $d_0 = 0,15R_{ДЗ}$ при фокусуванні ЛАР на різну дальність d_i , $i=1...6$; б) на пеленгу $\beta_0=0^\circ$ та різних дальностях d_i , $i=1...6$.

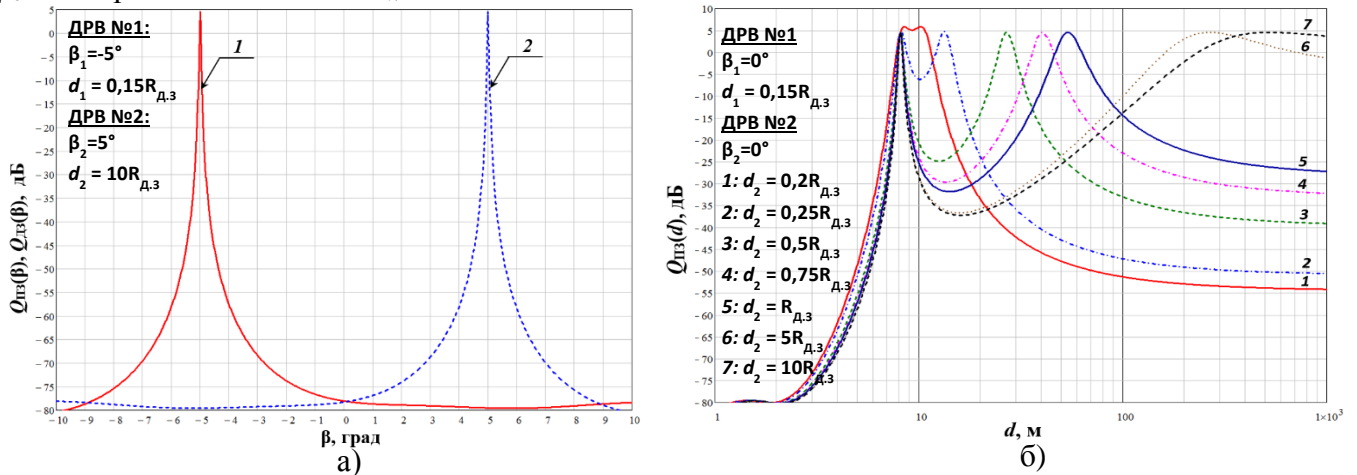


Рисунок 12 – Просторовий спектр при пеленгуванні двох ДРВ, що розташовані а) в різних зонах на пеленгах і дальності $\beta_1=-5^\circ$, $d_1 = 0,15R_{ДЗ}$ (проміжна зона), $\beta_2=5^\circ$, $d_2 = 10R_{ДЗ}$ (далека зона) при фокусуванні ЛАР на дальності d_1 (крива 1) та d_2 (крива 2); б) на пеленгу $\beta_0=0^\circ$ та різних дальностях $d_1=0,15R_{ДЗ}=\text{const}$ та $d_2 = 0,2R_{ДЗ}$; $0,25R_{ДЗ}$; $0,5R_{ДЗ}$; $0,75R_{ДЗ}$; $R_{ДЗ}$; $5R_{ДЗ}$; $10R_{ДЗ}$

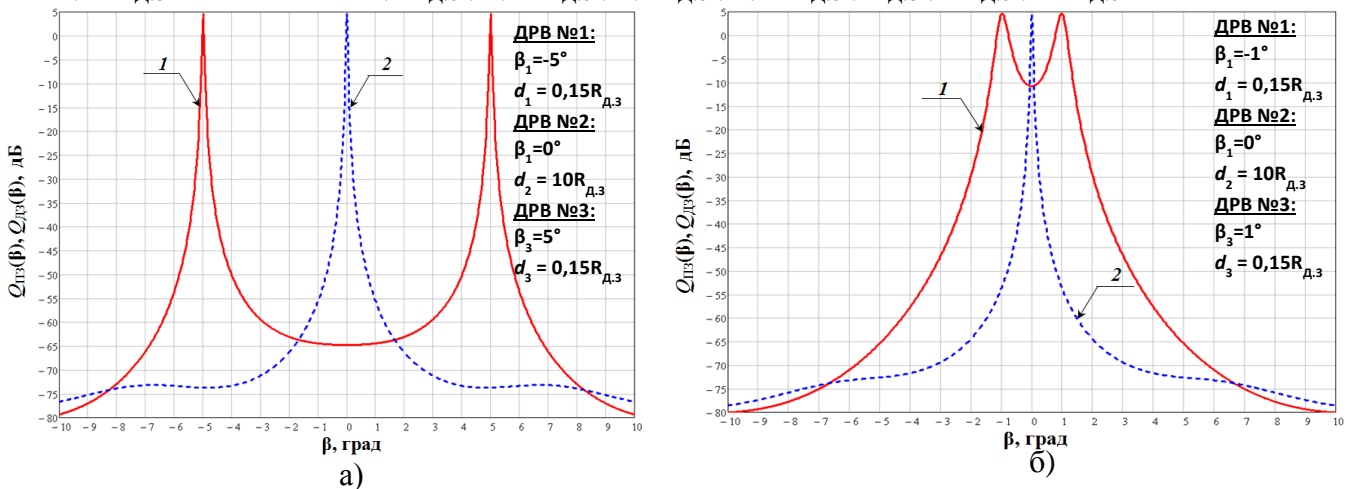


Рисунок 13 – Просторовий спектр при пеленгуванні трьох ДРВ, що розташовані в різних хвильових зонах при фокусуванні АР в далеку зону (крива 2) та проміжну зону (крива 1) на дальність $d_0 = 0,15R_{ДЗ}$ на пеленгах а) $\beta_1=-5^\circ$ (проміжна зона), $\beta_2=0^\circ$ (далека зона), $\beta_3=5^\circ$ (проміжна зона); б) $\beta_1=-1^\circ$ (проміжна зона), $\beta_2=0^\circ$ (далека зона), $\beta_3=1^\circ$ (проміжна зона)

Узагальнений удосконалений метода Кейпона при $N > 1$ відповідно до (13) дозволяє забезпечити подальше збільшення розрізняльної здатності ДРВ проміжної зони за кутовою координатою (пеленгом) та дальністю у порівнянні з удосконаленим методом Кейпона (рис.14-рис.15).

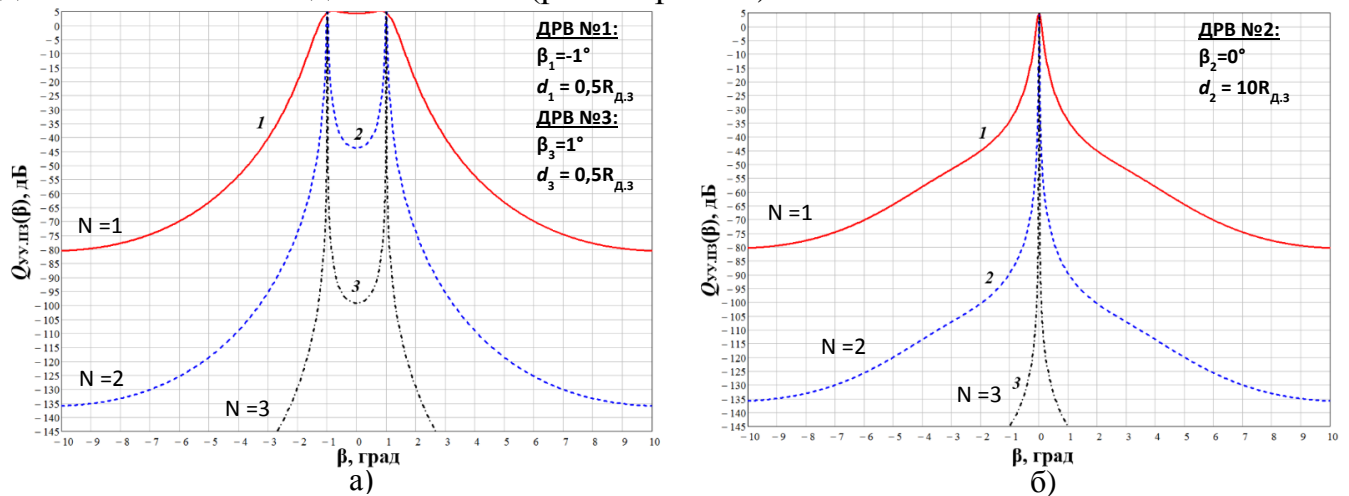


Рисунок 14 – Просторовий спектр для проміжної (а) та далекої (б) зони при застосуванні удосконаленого методу Кейпона (крива 1) та узагальненого удосконаленого методу Кейпона (крива 2 (для $N=2$) та крива 3 (для $N=3$)) при пеленгуванні 3-х ДРВ, два з яких розташовані на пеленгах $\beta_1 = -1^\circ$ та $\beta_3 = 1^\circ$ в проміжній зоні на дальності $d_1 = d_3 = 0,5R_{Д.З}$, а третє ДРВ розташоване на пеленгу $\beta_2 = 0^\circ$ в далекій зоні

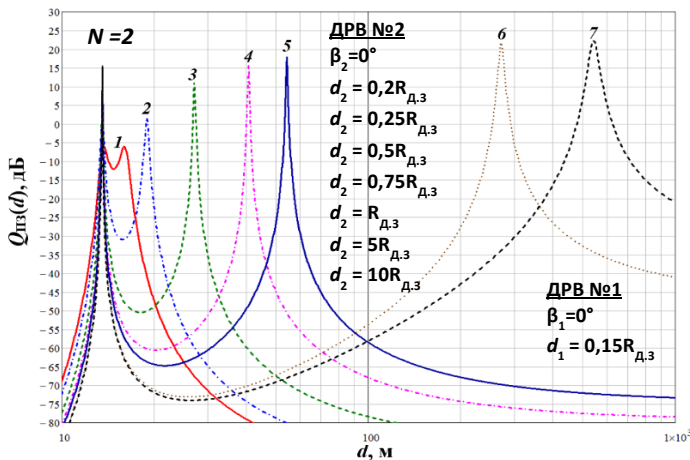


Рисунок 15 – Просторовий спектр при застосуванні узагальненого удосконаленого методу Кейпона при $N=2$ в залежності від дальності для двох ДРВ, розміщених на пеленгу $\beta_1 = \beta_2 = 0^\circ$. Відстань до 1-го ДРВ $d_1 = 0,15R_{Д.З}$, а відстань до другого ДРВ: $d_2 = 0,2R_{Д.З}$ (крива 1); $d_2 = 0,25R_{Д.З}$ (крива 2); $d_2 = 0,5R_{Д.З}$ (крива 3); $d_2 = 0,75R_{Д.З}$ (крива 4); $d_2 = R_{Д.З}$ (крива 5); $d_2 = 5R_{Д.З}$ (крива 6); $d_2 = 10R_{Д.З}$ (крива 7)

Головні обмеження, що накладаються на запропоновану математичну модель вектора-гіпотези $S_\alpha(\beta, d)$:

1. відсутність випадкових флуктуацій просторових структур ЕМХ, що приймаються;
2. відсутність впливу багатопроменевого поширення ЕМХ;
3. ідентичність елементів та приймальних каналів ЛАР.

Головна перевага запропонованої математичної моделі та удосконаленого методу пеленгації Кейпона на її основі полягає у можливості оцінки кількості ДРВ не тільки далекої, але й проміжної зони, а також визначення разом з пеленгом кожного ДРВ проміжної зони його дальності розташування.

У четвертому розділі роботи запропоновано метод просторової селекції сигналу по сферичному фазовому фронту ЕМХ, основні етапи якого показані на рис.16.



Рисунок 16 – Основні етапи удосконаленого методу просторової селекції за формою фазового фронту ЕМХ

Головною відмінністю запропонованого методу просторової селекції є наявність етапу визначення кількості та координат ДРВ в далекій та проміжній зоні на базі удосконаленого методу пеленгації Кейпона по сферичному фронту ЕМХ, що запропонований в розділі 3. Вказана відмінність для здійснення просторової селекції сигналу від обраного ДРВ дозволяє сформувати вектор вагових коефіцієнтів (ВВК) діаграмоутворюючих схем (ДУС) еквідистантної ЛАР, який враховує можливу сферичність фазових фронтів ЕМХ від ДРВ.

Основні обмеження, при яких було отримано математичні співвідношення для розрахунку ВВК ДУС, ДС ЛАР, коефіцієнти ослаблення корисного сигналу, придушення завади, виграшу при застосуванні оптимальної просторової селекції полягають у наступному:

а) всі канали ЛАР є ідентичними з точки зору вигляду форм амплітудно-та фазочастотних частотних характеристик;

б) середовище розповсюдження радіохвиль є однорідним з дисперсією фазових флуктуацій $\sigma_\varphi^2 = 0$, тобто воно не спотворює фазові fronti корисного сигналу та завад на розкритті ЛАР;

в) напрямки надходження корисного сигналу й завад не змінюються й не флуктують.

Згідно з рис.16 ВВК оптимальної просторової селекції згідно рівняння Вінера-Хопфа дорівнюватиме

$$\mathbf{w} = \mu \mathbf{R}_{NN}^{-1} \mathbf{S}_{\alpha 0} = \frac{\mu}{\sigma_0^2} \left(\sum_{n=1}^N h_n \mathbf{N}_{v_n} \mathbf{N}_{v_n}^H + \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{S}_{\alpha 0}, \quad (14)$$

де $\mathbf{R}_{NN}^{-1} = \left(E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] \right)^{-1} = \frac{1}{\sigma_0^2} \left(\sum_{n=1}^N h_n \mathbf{N}_{v_n} \mathbf{N}_{v_n}^H + \mathbf{I} \right)^{-1}$ – обернена кореляційна матриця завад та шумів; $\mathbf{x}(t)$ – вектор-стовпець адитивної суміші корисного сигналу, n -ої кількості завад та внутрішніх шумів ЛАР; $E[\cdot]$ – оператор статистичного усереднення; N – кількість зовнішніх завад; σ_0^2 – потужність внутрішніх гаусівських шумів в каналі ЛАР; h_n – відношення потужності завади від n -го джерела завад до потужності

власних шумів у каналі АР; $\mathbf{S}_{\alpha 0}, \mathbf{N}_{v_n}$ – вектор-стовпці просторових структур ЕМХ від ДРВ корисного сигналу та ДРВ n -ої завади розміром $M \times 1$ на розкритті ЛАР, $n = 1 \dots N$; \mathbf{I} – одинична матриця розміром $M \times M$; μ – константа.

У свою чергу просторові структури ЕМХ від ДРВ корисного сигналу та ДРВ n -ої завади на розкритті ЛАР можна подати у вигляді

$$\mathbf{S}_{\alpha 0} = \mathbf{S}_{\alpha}(\beta_s, d_s) = \mathbf{A}(\beta_s, d_s) \mathbf{S}_{\text{пл.}\alpha 0}(\beta_s), \quad \mathbf{N}_{v_n} = \mathbf{N}_v(\beta_n, d_n) = \mathbf{A}(\beta_n, d_n) \mathbf{N}_{\text{пл.}v}(\beta_n), \quad (15)$$

де $\mathbf{S}_{\text{пл.}\alpha}(\beta_s) = F_0(\beta_s) \begin{bmatrix} e^{-j\left(\frac{M-1}{2}\right)\Delta\varphi(\beta_s)} & e^{-j\left(\frac{M-3}{2}\right)\Delta\varphi(\beta_s)} & \dots & e^{j\left(\frac{M-1}{2}\right)\Delta\varphi(\beta_s)} \end{bmatrix}^T = \mathbf{S}_{\alpha}(\beta_s) e^{j\left(\frac{M-1}{2}\right)\Delta\varphi(\beta_s)}$ – вектор-стовпець

просторової структури ЕМХ з плоским фазовим фронтом від ДРВ корисного

сигналу, а $\mathbf{N}_{\text{пл.}v}(\beta_n) = F_0(\beta_n) \begin{bmatrix} e^{-j\left(\frac{M-1}{2}\right)\Delta\varphi(\beta_n)} & e^{-j\left(\frac{M-3}{2}\right)\Delta\varphi(\beta_n)} & \dots & e^{j\left(\frac{M-1}{2}\right)\Delta\varphi(\beta_n)} \end{bmatrix}^T = \mathbf{N}_v(\beta_n) e^{j\left(\frac{M-1}{2}\right)\Delta\varphi(\beta_n)}$ – відповідно

вектор-стовпець просторової структури ЕМХ з плоским фазовим фронтом від ДРВ n -ої завади, що розташовані на пеленгах β_s та β_n у далекій зоні; $\Delta\varphi(\beta_s) = 2\pi L \sin \beta_s / \lambda$,

$\Delta\varphi(\beta_n) = 2\pi L \sin \beta_n / \lambda$ – фазові зсуви між сусідніми елементами ЛАР для плоского фазового фронту ЕМХ (рис.9,б), які відповідно надходять від ДРВ корисного та n -го завадового сигналів, що розташовані у далекій зоні; $\mathbf{A}(\beta_s, d_s)$, $\mathbf{A}(\beta_n, d_n)$ – діагональні матриці розміру $M \times M$, що містять квадратичні доданки до фазових зсувів плоскої ЕМХ корисного сигналу та плоскої ЕМХ n -ої завади, і які відповідно можна назвати матрицями сферичності фазових фронтів корисного сигналу та n -ої завади, d_s та d_n – відповідно дальності до ДРВ корисного сигналу та n -ої завади, $n = 1 \dots N$, $F_0(\beta)$ – ДС окремого елемента ЛАР, яку в при застосуванні слабоспрямованих антен вважатимемо рівною 1.

Матриця $\mathbf{A}(\beta_s, d_s)$ може бути представлена як

$$\mathbf{A}(\beta_s, d_s) = \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\varphi_{\text{сф.}1}(\beta_s, d_s)) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \exp(-j\Delta\varphi_{\text{сф.}2}(\beta_s, d_s)) & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \exp(-j\Delta\varphi_{\text{сф.}M}(\beta_s, d_s)) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

де $\Delta\varphi_{\text{сф.}m}(\beta_s, d_s) = \pi(M+1-2m)^2 L^2 (\cos \beta_s)^2 / 4\lambda d_s$ – квадратичний доданок до фазового зсуву в m -ому каналі ЛАР для ЕМХ з плоским фазовим фронтом, який обумовлює сферичність фазового фронту ЕМХ корисного сигналу, $m = 1 \dots M$.

Матриця $\mathbf{A}(\beta_n, d_n)$ має вигляд, подібний до (16), але при заміні β_s на β_n , а d_s на d_n .

При переміщенні ДРВ корисного або n -го завадового сигналу у далеку зону ($d_s \rightarrow \infty$ або $d_n \rightarrow \infty$) отримаємо,

$$\mathbf{A}(\beta_n, d_n) = \mathbf{I}, \quad \mathbf{A}(\beta_s, d_s) = \mathbf{I}. \quad (17)$$

При дії однієї завади ($N = 1$) коефіцієнти ослаблення корисного сигналу та придушення завади після просторової обробки сигналів можна оцінити за формулами

$$K_{\text{осл}} = -20 \lg \left(1 - \frac{h_1 M}{1 + h_1 M} \rho_{\alpha 0 v_1}^2 \right), \quad K_{\Pi} = 20 \lg (1 + h_1 M), \quad (18)$$

де $\rho_{\alpha 0 v_1} = \mathbf{S}_{\alpha 0}^H \mathbf{N}_{v_1} / M$ – нормована функція просторової кореляції (ФПК) між невинуватими просторовими структурами (фазовими фронтами) ЕМХ корисного сигналу та завади.

На рис.17,а показано результати математичного моделювання ФПК від дальності d_1 до ДРВ завади, а на рис.17,б – коефіцієнту ослаблення корисного сигналу та придушення завади після просторової селекції від ФПК при $M = 20$, $\lambda = 0,3$ м, $L = 0,5\lambda$.

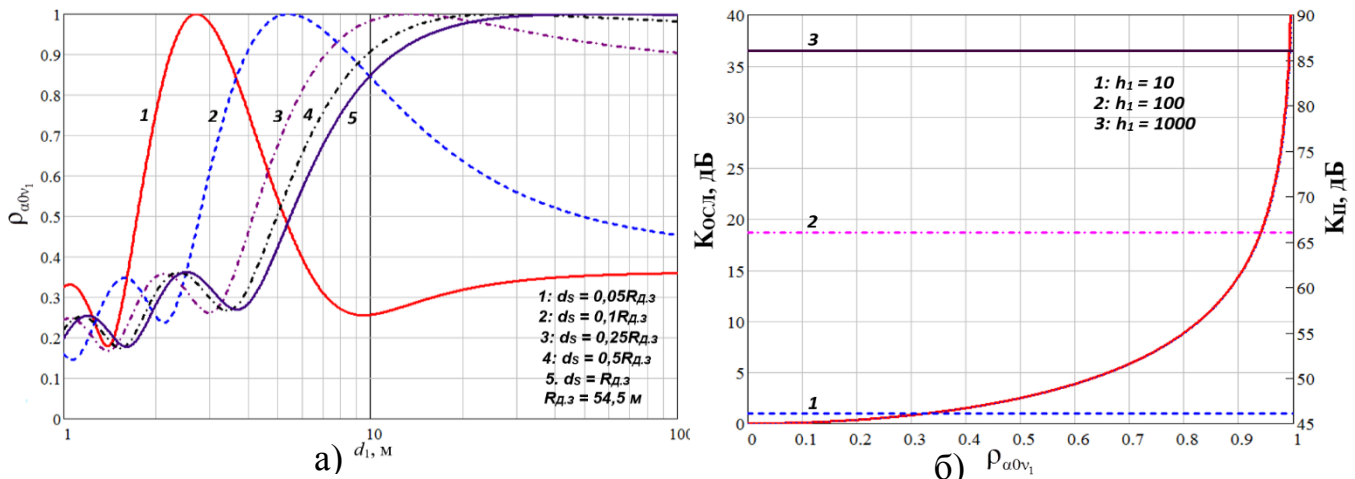


Рисунок 17 – а) Функція просторової кореляції $\rho_{\alpha 0 v_1}$ в залежності від дальності до ДРВ завади, розташованого на пеленгу $\beta_1 = 0^\circ$ при розташуванні ДРВ корисного сигналу на пеленгу $\beta_s = 0^\circ$ та дальностях: 1) $d_s = 0,05 R_{д.з}$; 2) $d_s = 0,1 R_{д.з}$; 3) $d_s = 0,25 R_{д.з}$; 4) $d_s = 0,5 R_{д.з}$; 5) $d_s = R_{д.з}$; б) залежність коефіцієнтів ослаблення корисного сигналу та придушення завади від значення ФПК

На рис.18,а відображено графік виграшу при оптимальній просторовій обробці у порівнянні з неоптимальною просторовою обробкою (тобто фокусуванням на ДРВ корисного сигналу) в залежності від значення ФПК, а на рис.18,б в залежності від дальності d_1 до ДРВ завади.

На рис.19,а показано залежність коефіцієнту ослаблення корисного сигналу після оптимальної просторової обробки сигналів на фоні однієї, а на рис.19,б на фоні двох завад від дальності до ДРВ корисного сигналу при співпадінні пеленгів ДРВ корисного та завадових сигналів. На рис.20 показано ДС ЛАР до та після просторової селекції корисного сигналу від ДРВ далекої зони на фоні завади від ДРВ проміжної зони.

У результаті аналізу результатів математичного моделювання потенційних характеристик методу просторової селекції по сферичному фазовому фронту ЕМХ (рис.17-рис.20) встановлено, що найбільша теоретична ефективність просторової селекції з точки зору мінімального ослаблення потужності корисного сигналу при співпадінні пеленгів ДРВ корисного сигналу та ДРВ завади досягається при розташуванні ДРВ в різних хвильових зонах і якомога більшому їхньому взаємному рознесенні за дальністю одне відносно іншого, коли суттєво проявляється сферичність фазового фронту ЕМХ від одного або кількох ДРВ.

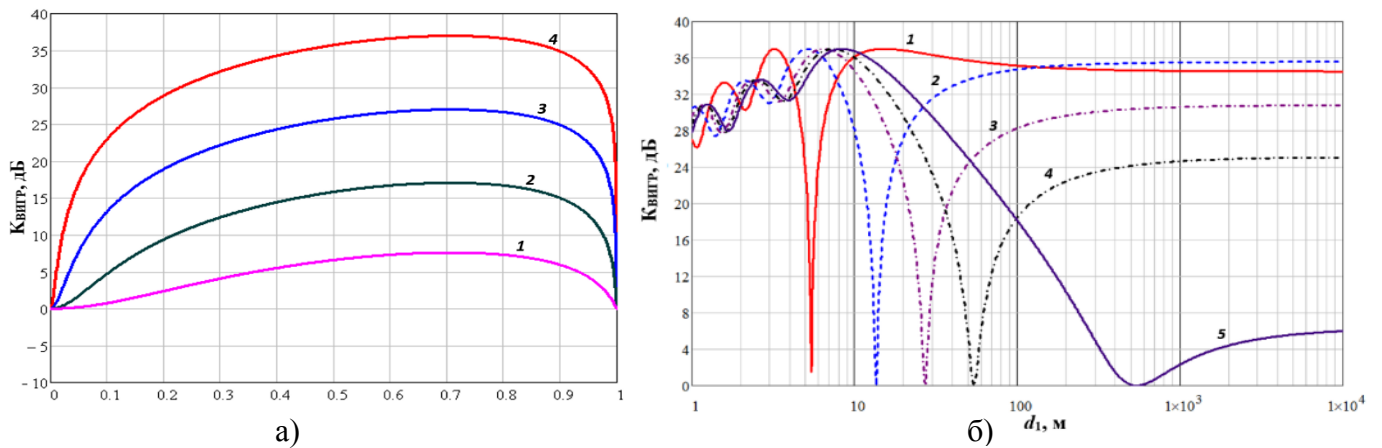


Рисунок 18 – Залежність виграшу при оптимальній просторовій обробці у порівнянні з неоптимальною просторовою обробкою: а) в залежності від значення ФПК при 1) $h_1 = 1$; 2) $h_1 = 10$; 3) $h_1 = 100$; 4) $h_1 = 1000$; б) в залежності від дальності d_1 до ДРВ заводи для $h_1 = 1000$ та $\beta_1 = \beta_s = 0^\circ$ при розташуванні ДРВ корисного сигналу на дальності 1) $d_s = 0,1R_{\text{ДЗ}}$; 2) $d_s = 0,25R_{\text{ДЗ}}$; 3) $d_s = 0,5R_{\text{ДЗ}}$; 4) $d_s = R_{\text{ДЗ}}$; 5) $d_s = 10R_{\text{ДЗ}}$

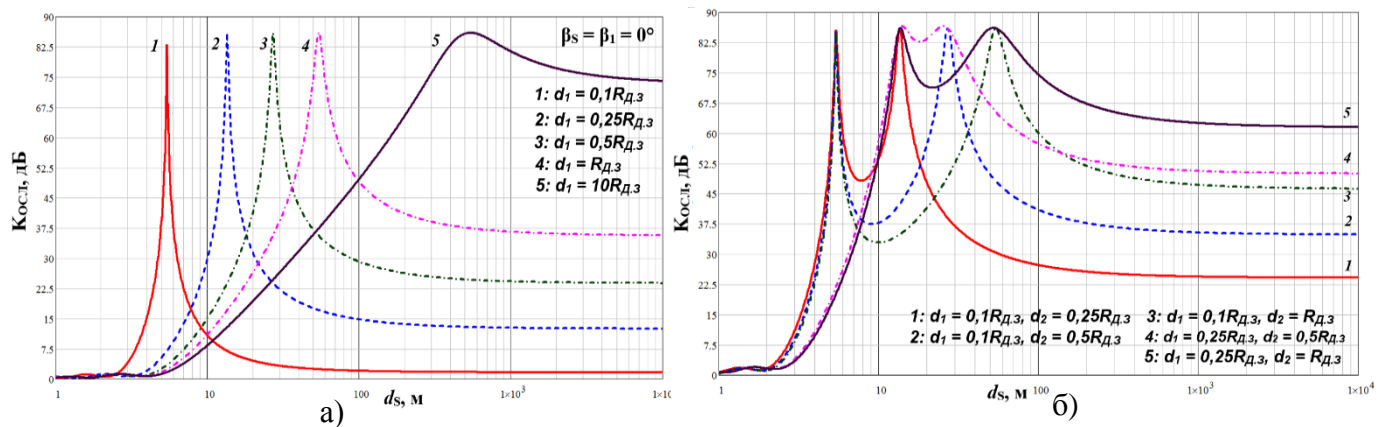


Рисунок 19 – Залежність коефіцієнту ослаблення корисного сигналу після оптимальної просторової селекції від дальності d_s до ДРВ корисного сигналу (а) при $\beta_1 = \beta_s = 0^\circ$ розташуванні ДРВ заводи на дальності d_1 ; б) при наявності 2-х ДРВ заводів, що розташовані на пеленгах $\beta_1 = \beta_2 = \beta_s = 0^\circ$ та дальностях d_1, d_2 від дальності d_s до ДРВ корисного сигналу

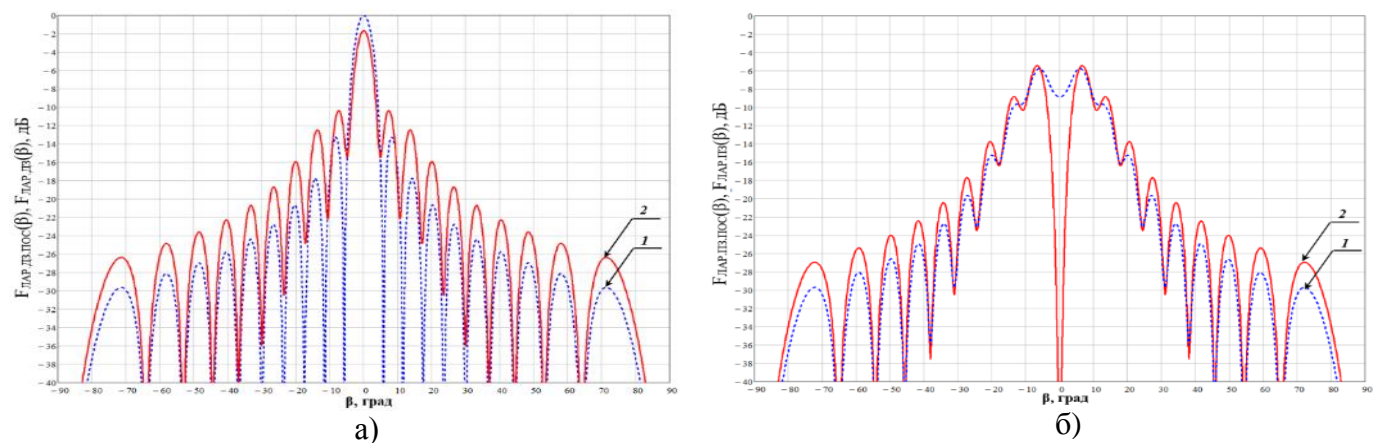


Рисунок 20 – Залежність ДС ЛАР від пеленгу при розташуванні ДРВ заводи в проміжній зоні на пеленгу $\beta_1 = 0^\circ$ та дальності $d_1 = 0,1R_{\text{ДЗ}}$ до (крива 1) та після (крива 2) просторової селекції корисного сигналу, ДРВ якого розташоване на пеленгу $\beta_s = 0^\circ$ та дальності $d_s = 10R_{\text{ДЗ}}$ а) для далекої зони; б) для проміжної зони на відстані $d = 0,1R_{\text{ДЗ}}$.

У лабораторних умовах відповідно до рис.21- рис.22 в проміжній хвильовій зоні було проведено експериментальне дослідження просторової селекції ДРВ корисного сигналу на фоні двох ДРВ завад в НВЧ діапазоні ($\lambda = 0,03$ м), результати якого у вигляді вимірних значень коефіцієнтів ослаблення корисного сигналу ($K_{осл}$) та придушення завад ($K_{п.зав.1}$, $K_{п.зав.2}$) показані в табл.6 і яке підтвердило можливість селекції сигналу по сферичності фазового фронту ЕМХ на фоні завад, ЕМХ яких мають ідентичні з ЕМХ корисного сигналу поляризаційно-частотні характеристики.



а)



б)

Рисунок 21 – Фото: а) передавальної частини при наявності 3-х ДРВ які розташовані на одному пеленгу, але різних відстанях; б) приймальної частини експериментального зразка на основі 3-х елементної ЛАР при базі $L_1 = 0,4$ м

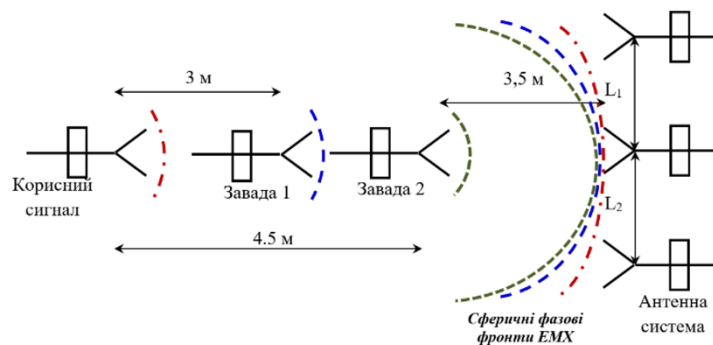


Рисунок 22 – Розташування ДРВ корисного сигналу та 2-х ДРВ завад на одному пеленгу, але різних дальностях для експериментального дослідження просторової селекції по сферичності фазового фронту ЕМХ

Таблиця 6 – Результати експериментального дослідження просторової селекції корисного сигналу по сферичності фазового фронту ЕМХ при співпадінні пеленга ДРВ корисного сигналу та ДРВ 2-х завад

Показник	База антенної системи $L_1=L_2$		
	0.6 м	0.4 м	0.20 м
$K_{осл}$, дБ	9	5	9
$K_{п.зав.1}$, дБ	32	18	21
$K_{п.зав.2}$, дБ	25	16	28

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача – розробка методів просторової обробки сигналів по сферичному фазовому фронту ЕМХ для визначення координат місцеположення ДРВ проміжної зони у системах фазової радіопеленгації та просторової селекції сигналу обраного ДРВ від сигналів інших ДРВ з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками ЕМХ, у тому

числі при відсутності рознесення між ДРВ за кутовими координатами, але за наявності такого рознесення за дальністю розташування ДРВ.

У результаті виконання дисертаційної роботи отримано наступні результати:

1. Вперше розроблено фазовий метод пеленгації джерела радіовипромінювання, в математичній моделі якого враховано сферичність фазового фронту електромагнітної хвилі, що дозволяє визначати пеленг та дальність для одного джерела радіовипромінювання при його розташуванні у проміжній хвильовій зоні.

2. Удосконалено метод пеленгації Кейпона шляхом введення у вектор-гіпотезу антенної решітки замість математичної моделі електромагнітної хвилі з плоским фазовим фронтом моделі зі сферичним фронтом, що дозволяє визначати пеленг та дальність для кількох джерел радіовипромінювання при їх розташуванні в проміжній хвильовій зоні.

3. Удосконалено метод просторової селекції сигналів, який відрізняється тим, що використовує метод пеленгації кількох джерел радіовипромінювання для отримання інформації про просторове положення джерел радіовипромінювання, що дозволяє по сферичності фазових фронтів електромагнітних хвиль розділяти один від одного сигнали з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками від кількох джерел радіовипромінювання, в тому числі й при співпадінні їх пеленгів.

4. Запропоновано технічні рішення з побудови фазових пеленгаторів та фазових радіосистем визначення координат по сферичному фазовому фронту ЕМХ, які можуть бути використані у радіоелектронній промисловості розробниками апаратури РТС для побудови технічних засобів радіопеленгації та радіомоніторингу ДРВ, при розробці апаратури для радіолокаційних систем;

5. Розроблено структурну схему та алгоритм практичної реалізації системи просторової селекції по сферичному фронту ЕМХ, яка дозволяє розділяти радіосигнали з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками від двох та більше ДРВ, що розташовані на одному пеленгу, але на різних дальностях.

6. Запропоновано варіанти структурних схем системи супроводження рухомих об'єктів з просторовою селекцією сигналів по сферичності фазового фронту ЕМХ в умовах впливу на навігаційний канал та/або канал зв'язку навмисних завад.

7. Розроблено структурну схему двоканальної телевізійної системи НВЧ діапазону, яка при її технічній реалізації може бути використана при побудові наземних мереж розподілу телевізійних сигналів, а також для ущільнення стволів радіорелейних ліній при одночасному передаванні та прийманні в одній і тій самій смузі радіочастот двох мультиплексів цифрового телевізійного мовлення.

8. Розроблено лабораторний макет компенсатору завад для дослідження просторової селекції ЕМХ по сферичному фазовому фронту ЕМХ від двох джерел радіовипромінювання НВЧ діапазону, що розташовані на одному пеленгу.

9. Розроблено лабораторний макет двоканальної телевізійної системи НВЧ діапазону з просторовою селекцією сигналів по сферичності фазового фронту ЕМХ, що може бути використаний при проведенні експериментальних досліджень у напрямку підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу систем телевізійного мовлення та радіорелейного зв'язку або в навчальному процесі.

Новизна більшості математичних моделей, технічних рішень, методів та алгоритмів просторової обробки сигналів по сферичності фазового фронту ЕМХ підтверджена 20 патентами на способи та радіотехнічні системи.

Результати виконаного дисертаційного дослідження можуть будуть використані відомчими установами України в галузі телекомунікацій та розробниками апаратури РТС.

Подальшим напрямком наукового дослідження може бути, наприклад, дослідження просторової селекції по сферичності фазового фронту ЕМХ для підвищення продуктивності дуплексних одночастотних радіорелейних ліній зв'язку.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Федоров В. І., Якорнов Є. А. Підвищення точності супроводу важливих транспортних засобів у системах диспетчеризації з використанням глобальних супутникових систем радіонавігації. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2006. №4. С.233–239. *Особистий внесок: здобувачем запропоновано спосіб визначення різниці різниць фаз методом множення частоти*
2. Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Авдеєнко Г. Л. Визначення подвійної різниці фаз у фазових мікрохвильових системах вимірювання координат. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2007. №6. С.28–36. *Особистий внесок: здобувач виконав математичне моделювання залежності дальності до ДРВ від різниці різниць фаз в каналах лінійної АР.*
3. Авдеєнко Г.Л., Федоров В. И., Якорнов Е. А. Определение местоположения источника радиоизлучения по кривизне фронта электромагнитной волны *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. Киев, 2008. Том 51. №3. С.1-7. *Особистий внесок: здобувач отримав математичні співвідношення для визначення дальності та пеленгу ДРВ по сферичності фазового фронту його ЕМХ.* (Стаття у науковому виданні, що включене до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України та проіндексоване в наукометричній базі **Scopus**)
4. Авдеєнко Г. Л. Аналіз впливу активних перешкод на радіоканали транспортного засобу в системах диспетчеризації. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2008. №15. С. 5–14.
5. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Федоров В. І., Якорнов Є. А. Визначення координат точкового джерела радіовипромінювання по кривизні його хвильового фронту. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*. Київ, 2008. № 20-21. С.74–79. *Особистий внесок: здобувач отримав математичні співвідношення для визначення дальності та пеленгу ДРВ по сферичності фазового фронту його ЕМХ.*

6. Авдеєнко Г. Л., Мазуренко А. В., Якорнов Е. А. Измерение разности разностей фаз в системах с пространственной обработкой сигналов СВЧ-диапазона. *Техника и приборы СВЧ*. Одесса, 2008. №1. С.42–45. *Особистий внесок: здобувачем описано спосіб визначення різниці різниць фаз методом множення частоти.*
7. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Мазуренко О. В., Якорнов Є. А. Підвищення точності виміру подвійної різниці фаз у малобазових фазових системах із просторовою обробкою сигналів. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2008. №16. С.36–41. *Особистий внесок: здобувачем запропоновано спосіб визначення різниці різниць фаз методом множення частоти.*
8. Авдеєнко Г. Л., Гелесев О. І., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Мазуренко О. В. Розробка оптимальних методів просторово-часової обробки сигналів радіоелектронних засобів на основі використання чотиривимірних матриць. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2008. №14. С.61–73. *Особистий внесок: здобувачем проведено математичне моделювання ефективності просторово-часової обробки сигналів на базі використання кронекерівського добутку.*
9. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А. Синтез алгоритмів просторово-часової обробки сигналів для просторової режекції перешкод в антенних системах з широкою характеристикою спрямованості. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2009. №19. С.34–44. *Особистий внесок: здобувачем запропоновано методіку синтезу алгоритму просторово-часової обробки сигналів для антенних систем з широкою ХС.*
10. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Коломицев М. О., Мазуренко О. В., Ліпчевська І. Л. Пріоритетні напрямки розвитку адаптивної обробки радіосигналів для підвищення ефективності функціонування бездротової мережі зв'язку з розподіленими антенними системами. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2010. № 28. С.65–70. *Особистий внесок: здобувачем проаналізовано особливості застосування просторово-часової обробки в умовах наявності некорельованих складових сигналу.*
11. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Ліпчевська І. Л., Мазуренко О. В. Сучасний стан обробки радіосигналів бездротової мережі зв'язку в передавальних антенних системах базових станцій. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2010. №27. С.42–46. *Особистий внесок: здобувачем проаналізовано методи просторово-часової обробки сигналів в системах безпроводового зв'язку, що базуються на використанні принципів просторового, кодового та часового рознесення елементів сигналу.*
12. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Коломицев М. О. Застосування математичного апарату торцевих добутків матриць для опису оптимального вектору вагових коефіцієнтів адаптивної антенної решітки з неідентичними каналами обробки. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного*

університету імені Тараса Шевченка. Київ, 2011. № 30. С.34–39. *Особистий внесок: здобувачем отримано рівняння для розрахунку вектору вагових коефіцієнтів на базі використання торцевих добутків.*

13. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Коломицев М. О., Якорнов Є. А., Ряба Л. О. Моделювання роботи мобільної радіомережі з розподіленими антенними системами, діаграми спрямованості яких адаптовані до впливу завад при обмеженому частотному ресурсі. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2011. № 33. С.51-61. *Особистий внесок: здобувачем отримані адаптовані до дії завад характеристики спрямованості АР базових станцій.*

14. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Ліпчевська І. Л., Якорнов Є. А. Фазові радіопеленгатори джерела радіовипромінювання гармонічного сигналу в зоні Френеля. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*. Київ, 2011. №26. С.13–20. *Особистий внесок: здобувач розробив та описав принцип дії структурних схем фазових радіопеленгаторів та фазових радіосистем визначення координат, що враховують сферичність фазового фронту ЕМХ.*

15. Авдеєнко Г.Л., Якорнов Е.А., Липчевская И.Л. Фазовые системы определения координат источника радиоизлучения гармонического сигнала в зоне Френеля. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. Киев, 2012. Том 55. №2. с.24-33. *Особистий внесок: здобувачем розроблено та описано принципи дії структурних схем фазових радіопеленгаторів та фазових радіосистем визначення координат, що враховують сферичність фазового фронту ЕМХ.* (Публікація у науковому виданні, що включене до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України та проіндексоване в наукометричній базі **Scopus**)

16. Якорнов Є. А., Коломицев М. О., Авдеєнко Г. Л., Лаврінченко О. Ю. Теоретичний аналіз можливості застосування фізичного явища кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі в стаціонарних системах радіозв'язку надвисокочастотного діапазону. *Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. Київ, 2012. № 48. С. 84–96. *Особистий внесок: здобувач описав концепції застосування просторової селекції по формі фронту ЕМХ в стаціонарних безпроводових системах передавання інформації.*

17. Avdeyenko G. L., Kolomytsev M. A., Yakornov Ye. A. Efficiency of spatial signal processing in wireless communications. *Telecommunication Sciences*. 2012. Vol.3, No.2. P. 5-13. *Особистий внесок: здобувачем отримано математичні співвідношення та методику оцінювання ефективності просторової селекції радіосигналів по сферичності фазових фронтів ЕМХ в системах стаціонарного безпроводового зв'язку.*

18. Авдеєнко Г. Л., Якорнов Е. А. Расчёт показателей эффективности оптимальной пространственной обработки сигналов для радиолинии стационарной беспроводной телекоммуникационной системы. *Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. Київ, 2013. № 52. С.92–101. *Особистий внесок: здобувачем отримано математичні співвідношення та методика оцінювання ефективності*

просторової селекції радіосигналів по сферичності фазових фронтів ЕМХ в системах радіорелейного зв'язку.

19. Avdeyenko G. L., Yakornov Ye. A. Application of distributed antenna systems for determination of radiation source coordinates with use of phase method in Fresnel zone. *Information and Telecommunication Sciences*. 2017. Vol.8, No.1. P.37–50. *Особистий внесок: здобувачем розроблено та описано принципи дії структурних схем фазових радіопеленгаторів та фазових радіосистем визначення координат, що враховують сферичність фазового фронту ЕМХ.*

20. Авдеєнко Г. Л., Якорнов Є. А. Застосування просторово-часової обробки сигналів за формою фазового фронту електромагнітної хвилі у безпроводових телекомунікаційних системах. *Збірник наукових праць ВІТІ*. Київ, 2018. №4. С.6–13. *Особистий внесок: здобувачем розроблено та описано принцип дії стаціонарної безпроводової лінії зв'язку, в якій радіосигнали кількох абонентів одночасно передаються в одній й тій самій смузі радіочастот з різною сферичністю фазових фронтів їх ЕМХ.*

21. Авдеєнко Г. Л., Цуканов О. Ф., Якорнов Е. А. Повышение точности определения координат источников радиоизлучения фазовыми системами с линейными антенными решетками. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. Киев, 2019. Том 62. №12. С.772–781. *Особистий внесок: здобувачем проведено математичне моделювання динамічної помилки вимірювання дальності до ДРВ. (Публікація у науковому виданні, що включене до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України та проіндексоване в наукометричній базі **Scopus**)*

22. Avdieienko H., Yakornov Y. Application of Spatial Signal Processing by the Form of the Electromagnetic Wave Phase Front in Wireless Communication Systems. *Advances in Information and Communication Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2019. Vol 560. P. 239–261. *Особистий внесок: здобувачем виконано опис принципу дії макету симплексної одноінтервальної радіорелейної лінії з просторовою обробкою сигналів, а отримано також результати вимірювання коефіцієнтів ослаблення та придушення радіосигналів з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками та оцінка достовірності приймання відселектованих по сферичності фазових фронтів ЕМХ радіосигналів стандарту DVB-C з модуляцією 64-QAM. (Публікація у закордонному періодичному виданні *Lecture Notes in Electrical Engineering* (ISSN 1876-1100) іноземної держави (видавництво Springer Nature, **Швейцарія**), яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку, що індексується у наукометричній базі **Scopus**)*

Патенти на винахід:

23. Фазова радіосистема визначення координат : пат. 97075 Україна : МПК G01S 3/02. № 201105120; заявл. 21.04.2011; опубл. 26.12.2011, Бюл. №24 (кн. 1). 7 с. *Особистий внесок: здобувачем отримано математичні співвідношення для розрахунку координат ДРВ по сферичному фронту ЕМХ*

Патенти на корисну модель:

24. Система для супроводження рухомих об'єктів з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації : пат. 8150 Україна : МПК G01S 5/14. №200500740; заявл. 27.01.2005; опубл. 15.07.2005, Бюл. №7 (кн. 1). 7 с.

Особистий внесок: здобувачем запропоновано схемну реалізацію основних елементів системи супроводження

25. Система для супроводження рухомих об'єктів з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації : пат. 40138 Україна : МПК G01S 5/14. №200812684; заявл. 29.10.2008; опубл. 25.03.2009, Бюл. №6 (кн. 1). 7 с.

Особистий внесок: здобувачем отримано математичні співвідношення для розрахунку координат ДРВ по сферичному фронту ЕМХ

26. Система для супроводження рухомих об'єктів з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації : пат. 43982 Україна : МПК G01S 5/14. №200903823; заявл. 21.04.2009; опубл. 10.09.2009, Бюл. №17 (кн. 1). 7 с.

Особистий внесок: здобувачем розраховано систематичні похибки визначення координат ДРВ та запропоновано метод множення частоти для зменшення апаратної похибки визначення дальності до ДРВ

27. Адаптивна за відстанню антенна решітка : пат. 55438 Україна : МПК G01S 3/00, H01Q 3/00. № 201007929; заявл. 24.06.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. №23 (кн.1). 7 с.

Особистий внесок: здобувачем проведено патентний пошук

28. Фазовий радіопеленгатор : пат. 56430 Україна : МПК G01S 3/00, G01S 3/02. №201009233; заявл. 22.07.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. №1 (кн. 1). 7 с. *Особистий внесок: здобувачем розроблено математичний апарат процедури постійної перевірки відсутності або наявності кривизни фронту ЕМХ*

29. Фазовий радіопеленгатор : пат. 57200 Україна : МПК G01S 3/00. №201010554; заявл. 31.08.2010; опубл. 10.02.2011, Бюл. №3 (кн. 1). 7 с. *Особистий внесок: здобувачем отримано математичний вираз для пеленгаційної характеристики при розташуванні ДРВ в проміжній зоні*

30. Фазова радіосистема визначення координат : пат. 64696 Україна : МПК G01S 3/00. № 201106317; заявл. 19.05.2011; опубл. 11.10.2011, Бюл. №21 (кн. 1). 8 с.

Особистий внесок: здобувачем отримано математичні співвідношення для розрахунку координат ДРВ по сферичному фронту ЕМХ

31. Ширококутовий фазовий радіопеленгатор : пат. 64705 Україна : МПК G01S 3/00. № 201106662; заявл. 27.05.2011; опубл. 11.10.2011, Бюл. №21 (кн. 1). 8 с.

Особистий внесок: здобувачем отримано математичний вираз для пеленгаційної характеристики радіопеленгатора

32. Фазовий радіопеленгатор : пат. 67323 Україна : МПК G01S 3/48. № 201110328; заявл. 23.08.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. №3 (кн. 1). 8 с. *Особистий внесок: здобувачем розраховано помилки визначення координат ДРВ по сферичному фронту ЕМХ при застосуванні симетричних та несиметричних грубих шкал в радіопеленгаторі*

33. Фазовий радіопеленгатор : пат. 72448 Україна : МПК G01S 3/00, G01S 3/02. № 201114120; заявл. 29.11.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. №16 (кн. 1). 8 с. *Особистий внесок: здобувачем розроблено математичний апарат процедури постійної*

перевірки відсутності або наявності кривизни фронту ЕМХ та визначення координат ДРВ по сферичному фронту ЕМХ

34. Фазовий радіопеленгатор : пат. 78441 Україна : МПК G01S 3/48. № 201206912; заявл. 06.06.2012; опубл. 25.03.2013р, Бюл. №6 (кн. 1). 7 с. *Особистий внесок: здобувачем отримано математичні співвідношення для розрахунку координат ДРВ по сферичному фронту ЕМХ*

35. Система забезпечення зв'язку між двома радіорелейними станціями : пат. 103089 Україна : МПК H04B 7/14. №201410543; заявл. 26.09.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. №23 (кн. 1). 7 с. *Особистий внесок: здобувачем виконано математичне моделювання залежності відношення сигнал/(завада+шум) від розміру бази приймальної станції для різних відстаней між кореспондуючими станціями та для різних розмірів баз передавальної станції*

36. Система забезпечення зв'язку між двома радіорелейними станціями : пат. 104240 Україна : МПК H04B 7/14. №201503708; заявл. 20.04.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. №2 (кн. 1). 6 с. *Особистий внесок: здобувачем виконано математичне моделювання залежності відношення сигнал/(завада+шум) від розміру бази приймальної станції для різних відстаней між кореспондуючими станціями та для різних розмірів баз передавальної станції*

37. Спосіб забезпечення зв'язку між двома радіорелейними станціями: пат. 104241 Україна : МПК H04B 7/00, H04B 7/14. №201503709; заявл. 20.04.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. №2 (кн. 1). 6 с. *Особистий внесок: здобувачем розроблено структурну схему одноінтервальної радіорелейної лінії зв'язку з просторовим дуплексом по кривизні фронту ЕМХ*

38. Спосіб визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання в ближній зоні : пат. 113916 Україна : МПК G01S 5/08. №201606780; заявл. 09.09.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. №4 (кн. 1). 6 с. *Особистий внесок: здобувачем розроблено математичний апарат способу визначення координат ДРВ ближньої зони*

39. Спосіб просторової селекції джерел радіовипромінювання в довільній хвильовій зоні: пат. 121465 Україна : МПК G01S 5/08. №201705290; заявл. 30.05.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. №23 (кн.1). 6 с. *Особистий внесок: здобувачем розроблено математичний апарат способу просторової селекції ДРВ*

40. Система визначення дальності до джерела радіовипромінювання в зоні Френеля : пат. 132739 Україна : МПК G01S 5/00. №201809451; заявл. 19.09.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. №5 (кн.1). 6 с. *Особистий внесок: здобувачем розроблено структурну схему системи визначення дальності до ДРВ*

41. Спосіб визначення дальності до джерела радіовипромінювання в зоні Френеля : пат. №132740 Україна : МПК G01S 5/00. №201809452; заявл. 19.09.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. №5 (кн. 1). 6 с. *Особистий внесок: здобувачем описано основні етапи запропонованого способу визначення дальності до ДРВ по сферичному фронту ЕМХ*

42. Система забезпечення зв'язку між двома радіорелейними станціями : пат. №140040 Україна : МПК H04B 7/14. №201906270; заявл. 05.06.2019; опубл. 10.02.2020, Бюл. №3 (кн. 1). 6 с. *Особистий внесок: здобувачем виконано*

модельовання дальності зв'язку між кореспондуючими станціями в залежності від частоти, різниці різниць фаз та розміру бази антенної системи

Тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій:

43. Авдеенко Г. Л., Якорнов Е. А. Подавление источника радиоизлучения на основе использования различия в сферичности фронтов электромагнитных волн сигнала и помехи. 15-я Международная Крымская конференция “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (КрымиКо’2005): материалы конф. 12-16 сент. 2005 г. Севастополь: СевНТУ, 2005. Т.1, С. 264–265.
44. Авдеенко Г. Л. Применение алгоритмов пеленгации в системе дискриминации нескольких источников радиоизлучения по кривизне фронта электромагнитной волны. 16-я Международная Крымская конференция “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (КрымиКо’2006): материалы конф. 11-15 сент. 2006 г. Севастополь: СевНТУ, 2006. Т.1, С. 348–349.
45. Авдеенко Г.Л., Якорнов Е.А. Система дискриминации источников радиоизлучения по кривизне фронта электромагнитной волны. 16-я Международная Крымская конференция “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (КрымиКо’2006): материалы конф. 11-15 сент. 2006 г. Севастополь: СевНТУ, 2006. Т.1, С. 426–427.
46. Авдеенко Г. Л. Дискриминация источников помехового радиоизлучения на основании информации об их местоположении в радиотехнических системах. 17-я Международная Крымская конференция “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (КрымиКо’2007): материалы конф. 10-14 сент. 2007 г. Севастополь: СевНТУ, 2007. Т.1 С. 271–272.
47. Авдеенко Г.Л., Якорнов Е.А. Определение местоположения источника радиоизлучения по кривизне фронта электромагнитной волны. 17-я Международная Крымская конференция “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (КрымиКо’2007): материалы конф. 10-14 сент. 2007 г. Севастополь: СевНТУ, 2007. Т.1 С. 261–262.
48. Авдеенко Г. Л. Повышение диапазона определения дальности до источника радиоизлучения по кривизне фронта его электромагнитной волны. 3-я Международная молодёжная научно-техническая конференция “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” (РТ-2007): материалы конф. 16-21 апр. 2007 г. Севастополь: СевНТУ, 2007. С. 166.
49. Авдеенко Г. Л. Перспективы использования методов пространственно-временной обработки сигналов в современных радиотехнических системах. Перша науково-технічна конференція “Проблеми телекомунікацій” (ПТ-07): зб. тез. 25-27 квіт. 2007 р. Київ: НТУУ “КПІ”, 2007. С. 57–58.
50. Авдеенко Г. Л. Пространственно-временная обработка полезных сигналов на фоне радиопомех при использовании приемных антенн произвольной пространственной избирательности. 4-я Международная молодёжная научно-техническая конференция “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” (РТ-2008): материалы конф. 21-25 апр. 2008 г. Севастополь: СевНТУ, 2008. С. 146.

51. Авдеенко Г. Л. Определение угловых координат источников радиопомех, расположенных в ближней волновой зоне. Друга міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: зб. тез. 20-23 трав. 2008 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. С.154–156.
52. Авдеєнко Г. Л., Якорнов Е. А. Синтез алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов для пространственной дискриминации помех в антенных системах с широкой характеристикой направленности. Третя міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: зб. тез. 21-24 квіт. 2009 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. С.163–164.
53. Авдеенко Г. Л., Якорнов Е. А., Гелесев В. А. Схема режекции источников радиопомех для телекоммуникационных систем со слабонаправленными антеннами. Третя міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: зб. тез. 21-24 квіт. 2009 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. С. 63.
54. Авдеенко Г. Л., Якорнов Е. А., Веселова А. П., Войтко Ю. Н., Мазуренко А. В. Повышение точности определения двойной разности фаз путем умножения частоты обрабатываемых сигналов. Третя міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: зб. тез. 21-24 квіт. 2009 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. С. 35–36.
55. Авдеенко Г. Л., Якорнов Е. А. Пространственно-временная обработка сигналов для режекции помех в антенных системах с широкой характеристикой направленности. 19-ая Международная Крымская конференция “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМико ‘2009): материалы конф. 14-18 сент. 2009 г. Севастополь: СевНТУ, 2009. Т.1. С. 415–416.
56. Авдеенко Г.Л., Веселова А. П., Войтко Ю. Н., Мазуренко А. В., Якорнов Е. А. Повышение точности измерений фазовых соотношений обработкой сигналов на высокой промежуточной частоте. 19-я Международная Крымская конференция “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМико ‘2009): материалы конф. 14-18 сент. 2009 г. Севастополь: СевНТУ, 2009. Т.2. С. 746–747.
57. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А. Оцінка основних критеріїв просторово-часової обробки сигналів для придушення перешкод в антенних системах із широкою характеристикою направленості. Науково-практична конференція «Актуальні задачі фінансового, психологічного, правового, топогеодизичного, радіотехнічного та лінгвістичного забезпечення підрозділів та частин Збройних Сил України»: зб. тез доповідей. 2009 р. Київ: ВІКНУ, 2009. С. 111-112.
58. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Мазуренко О. В., Якорнов Є. А. Придушення джерела радіоперешкод у зоні Френеля за наявності відмінностей у кривизні фронтів електромагнітних хвиль сигналу та перешкоди Науково-практична конференція «Актуальні задачі фінансового, психологічного, правового, топогеодизичного, радіотехнічного та лінгвістичного забезпечення підрозділів та частин Збройних Сил України»: зб. тез доповідей. 2009 р. Київ: ВІКНУ, 2009. С.98.
59. Авдеєнко Г.Л., Коломицев М.О., Липчевська І.Л., Якорнов Є.А. Деякі результати теоретичного аналізу використання методів просторово-часової обробки радіосигналів у зоні Френеля. П'ята міжнародна науково-технічна конференція

- «Проблемы телекоммуникаций»: зб. тез. 21-24 квіт. 2009 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. С. 48.
60. Авдеенко Г.Л., Липчевская И.Л., Манюгина Д.В., Потапенко В. В., Якорнов Е.А. Фазовые радиопеленгаторы источника излучения гармонического сигнала в зоне Френеля. П'ята міжнародна науково-технічна конференція «Проблемы телекоммуникаций»: зб. тез. 21-24 квіт. 2009 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. С. 50.
61. Авдеенко Г. Л., Липчевская И. Л., Якорнов Е. А. Определение пеленга и дальности до источника радиоизлучения гармонического сигнала в зоне Френеля. 20-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМико '2010): материалы конф. 13-17 сент. 2010 г. Севастополь: СевНТУ, 2010. Т.1. С. 337-338.
62. Авдеенко Г. Л., Карпенко Б. О., Коломицев М. О., Якорнов Є. А. Застосування математичного апарату торцевих добуток матриць для опису оптимального вектору вагових коефіцієнтів адаптивної антенної решітки з неідентичними каналами обробки. VI Міжнародна науково-практичної конференції "Військова освіта та наука: сьогоднішня та майбутня": зб.тез доповідей. 25-26 лист. 2010 р. Київ: ВІКНУ, 2010. С.356.
63. Авдеенко Г.Л., Липчевская И.Л., Якорнов Е.А. Фазовая радиосистема определения координат источника радиоизлучения гармонического сигнала для работы в зоне Френеля. 21-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМико 2011): материалы конф. 12-16 сент. 2011 г. Севастополь: СевНТУ, 2011. Т.1. С.431-432.
64. Якорнов Е. А., Коломицев М. А. Авдеенко Г. Л., Лавриненко О. Ю. Теоретичний аналіз можливості використання фізичного явища кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі в стаціонарних системах радіозв'язку надвисокочастотного діапазону. Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: зб. тез. 22-29 лют. 2012 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. С.41-43.
65. Авдеенко Г. Л., Якорнов Е. А., Коломыцев М. А. Применение кривизны фазового фронта электромагнитной волны для переиспользования частотного ресурса радиорелейных линий связи. Шоста міжнародна науково-технічна конференція «Проблемы телекоммуникаций»: зб.тез. 24-27 квіт. 2012 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. С.268-261.
66. Авдеенко Г. Л. Исследование эффективности применения пространственной обработки радиосигналов с QAM-N модуляцией. 9-я Международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2013): материалы конф. 23-26 апр. 2013г. Севастополь: СевНТУ, 2013. С.114.
67. Авдеенко Г. Л., Липчевская И. Л., Якорнов Е. А. Фазовые радиосистемы определения координат источника излучения гармонического сигнала для работы в промежуточной волновой зоне. Сьома Міжнародна науково-технічна конференція «Проблемы телекоммуникаций»: зб. тез.16-19 квіт. 2013 р. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. С.187-190.
68. Авдеенко Г.Л., Якорнов Е.А. Расчёт показателей эффективности оптимальной пространственной обработки сигналов для радиолинии стационарной беспроводной

телекоммуникационной системы. Міжнародна науково-технічна конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи : матеріали конф.11-15 бер.2013р. Київ: НТУУ “КПІ”, 2013. С.119-120.

69. Авдеенко Г. Л., Липчевская И. Л., Матяш А. Ю., Якорнов Е. А. Фазовая радиосистема определения координат источника радиоизлучения фазоманипулированного сигнала для работы в зоне Френеля. 23-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМико-2013): материалы конф. 8-13 сент. 2013г. Севастополь: СевНТУ, 2013. Т.1. С. 314-315.

70. Авдеенко Г. Л. Исследование эффективности применения пространственной обработки радиосигналов с QAM-M модуляцией на радиолинии СВЧ диапазона. 23-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМико-2013): материалы конф. 8-13 сент. 2013г. Севастополь: СевНТУ, 2013. Т.1. С. 336-337.

71. Авдеенко Г. Л. Применение пространственной обработки радиосигналов на линии СВЧ диапазона с QAM-M модуляцией. Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии (PIC S&T-2013): сб.науч. трудов первой междунар. науч.-практ. конф. 9-11 окт. 2013 г. Харьков: ХНУРЭ, 2013. С. 233-235.

72. Якорнов Є. А, Авдеєнко Г. Л., Адамович О. М., Чижевська А. В. Підвищення продуктивності радіорелейної лінії зв'язку за рахунок використання фізичного явища кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі. Восьма Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: зб.тез. 22-25 квіт. 2014 р. Київ: НТУУ "КПІ", 2014. С. 457-459.

73. Авдеенко Г. Л., Бранчук В. Н., Якорнов Е. А. Широкополосный фазовый радиопеленгатор источника излучения гармонического сигнала. 24-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМико'2014): материалы конф. 7–13 сент.2014 г. Севастополь: СевНТУ, 2014, Т.1. С. 267-268.

74. Авдеенко Г. Л., Чижевская А. В., Якорнов Е. А. Возможности повышения производительности радиорелейных линий связи при нахождении их ретрансляторов в зоне Френеля. 24-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМико'2014): материалы конф. 7–13 сент. 2014 г. Севастополь: СевНТУ, 2014. Т.1. С. 296-297.

75. Авдеєнко Г. Л., Чижевська А. В. Необхідність застосування просторової селекції радіосигналів на цифрових радіорелейних лініях зв'язку. Четверта міжнародна науково-практична конференція молодих вчених – «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє»: матеріали четвертої міжнар. наук.-пр. конф. 30-31 жовт. 2014 р. Одеса: ОНАЗ, 2014. С. 4-6.

76. Branchuk V., Avdeyenko G. Using sparse antenna system to improve noise immunity in relay communication lines. First International Scientific-Practical conference Problems of infocommunications. Science and technology (PICS&T -2014) : Conference Proceedings, Kharkiv, Ukraine, October 14-17, 2014. Kharkiv: NURE, 2014. Vol.II, P.130-131.

77. Авдеєнко Г. Л., Чижевська А. В., Якорнов Є. А. Теоретичне дослідження просторової обробки сигналів на лініях цифрового радіорелейного зв'язку. Дев'ята Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" : зб. матеріалів конф. 21-24 квіт. 2015р : Київ: НТУУ "КПІ", 2015. С .176-178.
78. Бранчук В. М., Якорнов Є. А., Авдеєнко Г. Л. Дослідження просторової селекції сигналів з модуляцією QAM-N на фоні радіозавад при зміні різниці кутових координат та зміні величини бази антенної системи. Дев'ята Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" : зб. матеріалів конф. 21-24 квіт. 2015р : Київ: НТУУ "КПІ", 2015. С .182-184.
79. Авдеєнко Г. Л., Корсак В. В., Якорнов Є. А. Модифікація алгоритму Кейпона для визначення пеленгу на джерела радіовипромінювання при сферичних фронтах їх електромагнітних хвиль у місці прийому. Десята Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій": зб. матеріалів конф. 19-22 квіт. 2016 р. Київ: НТУУ "КПІ", 2016. С. 529-531.
80. Авдеєнко Г. Л., Корсак В. В., Якорнов Є. А. Моніторинг радіовипромінювання в ближній і проміжній зонах на основі алгоритму Кейпона. Десята Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій": зб. матеріалів конф. 19-22 квіт. 2016 р. Київ: НТУУ "КПІ", 2016. С. 532-534.
81. Avdeyenko G., Yakornov E., Korsak V Spatial processing algorithm of radiation sources in the near and intermediate zones of linear antenna array for monitoring systems. 2016 IEEE International Scientific Conference (UkrMiCo'2016): Conference proceedings. Kyiv, Ukraine, September 11–15, 2016. Kyiv: NTUU "KPI", 2016.
82. Авдеєнко Г. Л. Використання просторового ущільнення по кривизні фазового фронту електромагнітної хвилі для повторного використання радіочастотного ресурсу цифрових радіорелейних ліній зв'язку. Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: матеріали конф. 20-26 бер. 2017 р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С.149-151.
83. Авдеєнко Г.Л., Якорнов Є. А. Спосіб просторової селекції джерел радіовипромінювання в довільній хвильовій зоні на основі модифікованого алгоритму Кейпона. Одинадцята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» : зб. матеріалів конф. 18-21 квіт. 2017р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С.232-234.
84. Авдеєнко Г. Л., Якорнов Е. А. Задачи практической реализации радиорелейной линии связи на основе использования различий в формах фазовых фронтов их электромагнитных волн. Одинадцята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» : зб. матеріалів конф. 18-21 квіт. 2017р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С.235-237.
85. Avdeyenko G. Prototype of unidirectional microwave wireless communication system with spatial signals processing. 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 10-14 Sept. 2018, Odessa, Ukraine – p.1-4.
86. Авдеєнко Г. Л. Застосування просторової обробки сигналів для підвищення пропускної здатності ствола радіорелейної лінії. Восьма міжнародна науково-практична конференція молодих вчених – «Інфокомунікації – сучасність та

майбутнє»: матеріали восьмої міжнар.наук.-пр.конф. 14-16 лист. 2018р. Одеса: ОНАЗ, 2018. Ч.4. С.7-10.

87. Авдєєнко Г. Л. Застосування просторової обробки сигналів для забезпечення повторного використання радіочастотного ресурсу ліній радіорелейного та міжсупутникового зв'язку. Друга науково-практична конференція «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» : тези доповідей. 4 жовт. 2018р. Київ: НЦУВКЗ, 2018. С. 41.

88. Авдєєнко Г. Л., Якорнов Є. А. Макет симплексної одноінтервальної радіорелейної лінії зв'язку з просторовою обробкою сигналів. Тринадцята міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій": зб. матеріалів конф. 15-19 квіт.2019 р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С.150-152.

89. Gleb Avdeyenko Application of Spatial Signal Processing for Bandwidth Capability Improvement of Radio Relay Link. 2019 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T) – 2019. – pp.187-192.

АНОТАЦІЯ

Авдєєнко Г. Л. Методи просторової обробки сигналів в радіотехнічних системах при прийманні електромагнітних хвиль зі сферичними фазовими фронтами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена використанню просторової обробки сигналів по сферичному фазовому фронту ЕМХ для вирішення актуальної науково-технічної задачі – визначення координат (пеленга та дальності) для ДРВ проміжної зони та просторової селекції сигналу обраного ДРВ на фоні сигналів інших ДРВ.

У роботі розроблено фазовий метод пеленгації та удосконалено метод пеленгації Кейпона, які відповідно дозволяють визначати координати місцеположення для одного та декількох ДРВ проміжної зони по сферичному фронту ЕМХ. Удосконалено метод просторової селекції сигналів, що дозволяє по сферичності фазових фронтів ЕМХ розділяти один від одного сигнали з ідентичними поляризаційно-частотними характеристиками від кількох ДРВ, в тому числі й при співпадінні їх пеленгів, але за наявності рознесення за дальністю розташування ДРВ. На основі запропонованих методів представлено технічні рішення з побудови фазових радіопеленгаторів та систем просторової селекції сигналів. Проведено експериментальне дослідження, яке в лабораторних умовах підтвердило можливість здійснення просторової селекції сигналу по сферичному фронту ЕМХ від обраного ДРВ проміжної зони на фоні сигналів від інших ДРВ.

Ключові слова: фазовий фронт, електромагнітна хвиля, джерело радіовипромінювання, просторова обробка, фазовий радіопеленгатор, просторова селекція, антенна решітка, проміжна зона, далека зона, пеленг, дальність.

АННОТАЦИЯ

Авдеенко Г. Л. Методы пространственной обработки сигналов в радиотехнических системах при приеме электромагнитных волн со сферическими фазовыми фронтами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена использованию пространственной обработки сигналов по сферическому фазовому фронту ЭМВ для решения актуальной научно-технической задачи – определения координат (пеленга и дальности) для ИРИ промежуточной зоны и пространственной селекции сигнала выбранного ИРИ на фоне сигналов от других ИРИ.

В работе разработаны фазовый метод пеленгации и усовершенствован метод пеленгации Кейпона, которые соответственно позволяют определять координаты местоположения для одного и нескольких ИРИ промежуточной зоны по сферическому фронту ЭМВ. Усовершенствован метод пространственной селекции сигналов, позволяющий по сферичности фазовых фронтов ЭМВ разделять друг от друга сигналы с идентичными поляризационно-частотными характеристиками от нескольких ИРИ, в том числе и при совпадении их пеленгов, но при наличии разнесения по дальности расположения ИРИ. На основе предложенных методов представлены технические решения по построению фазовых радиопеленгаторов и систем пространственной селекции сигналов. Проведено экспериментальное исследование, которое в лабораторных условиях подтвердило возможность осуществления пространственной селекции сигнала по сферическому фронту ЭМВ от выбранного ИРИ промежуточной зоны на фоне сигналов от других ИРИ.

Ключевые слова: фазовый фронт, электромагнитная волна, источник радиоизлучения, пространственная обработка, фазовый радиопеленгатор, пространственная селекция, антенная решетка, промежуточная зона, дальняя зона, пеленг, дальность.

ANNOTATION

Avdieienko H. L. The methods of signals spatial processing in the radio engineering systems for electromagnetic waves reception with spherical phase fronts. – Manuscript copyright.

Thesis for a candidate degree in the specialty 05.12.17 – radio and television systems – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the spatial signal processing application by the shape of the electromagnetic wave phase front in radio engineering systems for solving actual scientific problems: determination of location coordinates and spatial signal selection of radio sources located in one or different regions, including the case of angular coordinates coincidence of the radiation sources.

The aim of the dissertation is to increase the efficiency of the radio sources positions determining located in the intermediate-field region and their spatial selection by developing and improving phase direction finding methods, as well as the method of spatial filtering, mathematical models of which take into account the sphericity of the electromagnetic wave phase front.

The following new scientific results are obtained in the thesis:

1. Phase method of a radio source direction finding was developed for the first time, where the sphericity of an electromagnetic wave phase front for the mathematical model of which is taken into account. This phase method allows to determine the bearing angle and distance for one radio source located in the intermediate-field region.
2. The Capon's method of direction finding was improved by entering the mathematical model of electromagnetic wave with the spherical phase front instead of the flat phase front model in the antenna array steering vector, which allows to determine the bearing angle and distance for several radio sources located in the intermediate-field region.
3. Spatial signal filtering method was improved by using direction finding method of several radio sources to obtain information about the spatial position of this radio sources. The method allows to separate from each other signals with identical polarization and frequency characteristics from several radio sources by the sphericity of the electromagnetic waves phase fronts, including the case when their bearing angles are equal.

The practical significance of the thesis is that:

1. The proposed technical solutions for the construction of phase direction-finders and phase radio-system for coordinates determination based on the spherical phase front of the electromagnetic wave can be used in the radioelectronics industry for the construction of technical means of direction-finding and radiomonitoring of radio sources, for development of the radar equipment.
2. The block diagram and algorithm of practical realization of the spatial selection system by the electromagnetic wave spherical front which allows to separate radio signals with identical polarization and frequency characteristics from two or more radio sources which located at the same bearing angle are developed.
3. Proposed variants of the structural diagrams of the tracking system of moving objects with the spatial selection of signals on the phase front sphericity in the conditions of influence on the navigation channel and / or communication channel of intentional interference.
4. The block diagram of dual-channel television system of microwave frequency range, which in its technical implementation can be used for the development of terrestrial distribution networks of television signal as well as for the radio relay links channel

multiplexing for simultaneously transmission and reception of two multiplexes of digital broadcasting television in the same frequency band.

5. An operative embodiment was developed to investigate the spatial signal selection by spherical phase front of the electromagnetic wave from two sources of microwave frequency range in case of its location at the same bearing angle.

6. An operative embodiment of a dual-channel television system of microwave frequency range with spatial signals selection by the sphericity of the electromagnetic wave phase front was developed. It can be used in experimental studies for improving the use of radio frequency resources in television and radio relay systems.

The novelty of most mathematical models, methods and algorithms of spatial signal processing by the sphericity of the electromagnetic wave phase front is confirmed by 20 patents for methods and radio engineering systems.

The proposed technical solutions for the application of spatial processing of electromagnetic waves with spherical phase fronts can be applied to improve phase direction-finders and passive radar systems, vehicle tracking systems with increased noise immunity to receive navigation and communications signals, for increasing the noise immunity of receiving signals in the conditions the angular coordinates of desired signal and interference radio sources coincidence, for ensuring the radio frequency resource re-use in the fixed wireless communication systems of line-of-sight.

Keywords: phase front, electromagnetic wave, radio source, spatial processing, phase direction-finder, spatial selection, antenna array, intermediate-field region, far-field region, bearing angle, distance.